

The energy consumption of trains in operation: simulation, a methodology for the analysis and influence of the driving style / Il consumo energetico di treni in esercizio: simulazione,

Original

The energy consumption of trains in operation: simulation, a methodology for the analysis and influence of the driving style / Il consumo energetico di treni in esercizio: simulazione, metodologia di analisi ed influenza dello stile di condotta / Bruno, Fabrizio; Coviello, Nicola; DALLA CHIARA, Bruno; Di Paola, A.; Pagliero, P.; Viktorov, Vladimir. - In: INGEGNERIA FERROVIARIA. - ISSN 0020-0956. - STAMPA. - LXX:4(2015), pp. 327-357.

Availability:

This version is available at: 11583/2606360 since: 2016-02-15T15:33:21Z

Publisher:

CIFI

Published

DOI:

Terms of use:

openAccess

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

default_article_editorial [DA NON USARE]

-

(Article begins on next page)

SCIENZA E TECNICA



Il consumo energetico di treni in esercizio: simulazione, metodologia di analisi ed influenza dello stile di condotta

*The energy consumption of trains in operation:
simulation, a methodology for the analysis and
influence of the driving style*

Dott. Ing. Fabrizio BRUNO^(*)
Dott. Ing. Nicola COVIELLO^(*)
Prof. Bruno DALLA CHIARA^(*)
Dott. Ing. Agostino DI PAOLA^(**)
Dott. Ing. Paolo PAGLIERO^(**)
Prof. Vladimir VIKTOROV^(***)

Sommario - L'articolo propone una metodologia d'analisi dei consumi energetici in ambito ferroviario, presentando un confronto tra un modello di calcolo analitico e delle misurazioni ed introducendo l'influenza sui consumi stessi di alcuni parametri caratterizzanti la traccia oraria.

Nella prima parte viene presentata l'analisi del profilo di velocità misurato di un treno passeggeri regionale e di un treno TGV che percorrono una linea tradizionale con elevate pendenze (la Torino-Modane), proponendo il confronto con i profili teorici ottenuti tramite simulazione. Da tale comparazione è quindi possibile desumere e quantificare le differenze tra il profilo di marcia effettivo e quello, simulato, che sfruttando completamente le caratteristiche di trazione del convoglio presenta il minor tempo di percorrenza possibile sulla linea in esame. Nella seconda parte, attraverso l'integrazione dell'equazione del moto implementata su foglio di calcolo, si focalizza l'attenzione sulla marcia di un convoglio merci percorrente solo un primo tratto della medesima linea. In questa parte l'analisi viene condotta introducendo importanti semplificazioni, come trascurando gli effetti della geometria della linea (piuttosto pianeggiante nella tratta considerata), al fine di semplificare il modello analitico. Con tali

Summary - The paper proposes an analysis methodology of energy consumptions in the railway field, presenting a comparison between an analytical calculation model and some measurements. It is hereafter assessed the influence of some parameters which characterise the travel diagrams of trains.

The first part illustrates the analysis of the measured speed profile of a regional passenger train and of a TGV train covering a conventional line, with a high grade (the Torino-Modane), then introducing the comparison with the hypothetical profile obtained through simulation. Such comparison therefore allows deducing and quantifying the differences between the real and the simulated travel diagram. The latter employs completely the traction performances of the convoy and, therefore, features the smallest travel time on the considered line.

The second part of this paper focuses the attention on the run of a freight train covering only one of the first sections of the same line, through the integration of the motion equation implemented on a spread sheet. In this part the analysis is carried on introducing important simplifications, as neglecting the effects of the line profile (rather flat in the considered stretch), in order to facilitate the analyti-

^(*) Politecnico di Torino, Ingegneria, Dip. DIATI, Sistemi di Trasporto.

^(**) Faiveley Transport Italy, Piosasco (TO).

^(***) Politecnico di Torino, Ingegneria, Dip. DIMEAS, Ingegneria Meccanica e Aerospaziale.

^(*) Politecnico di Torino, Engineering, Dept. DIATI, Transport systems.

^(*) Faiveley Transport Italy, Piosasco (TO).

^(*) Politecnico di Torino, Engineering, Dept. DIMEAS, Mechanical Engineering.

SCIENZA E TECNICA

assunzioni si analizza quindi l'influenza che l'impostazione della traccia orario e lo stile di condotta del macchinista esercitano sui consumi energetici. Maggiore enfasi viene posta sugli aspetti energetici legati alla fase di frenatura, con le connesse ricadute – di diretto impatto economico per gli operatori del trasporto – sulla manutenzione di freni e sale montate. Si evidenzia infine il ruolo di soluzioni tecnologiche innovative.

1. Introduzione ed obiettivi del lavoro

Negli ultimi anni, le problematiche economico-ambientali legate all'approvvigionamento e alla gestione delle risorse hanno enfatizzato la necessità di sviluppare sistemi di trasporto che siano maggiormente sostenibili dal punto di vista energetico. Sebbene il settore dei trasporti sia caratterizzato prevalentemente dall'impiego di mezzi con impiego a bordo di risorse primarie o loro derivati, vale a dire carburanti di derivazione petrolifera, la ferrovia risulta la modalità più efficiente dal punto di vista dei consumi quando ben sfruttata in termini di carico utile. Infatti le linee elettrificate vengono alimentate da centrali elettriche, a prescindere dalla fonte energetica [1].

L'energia utilizzata in ferrovia per l'esercizio dei convogli è strettamente correlata al carico trasportato – merci o passeggeri - alle caratteristiche strutturali e funzionali dei rotabili, alle peculiarità della linea (pendenza, tortuosità, condizioni di manutenzione dell'infrastruttura), alle condizioni ambientali, nonché al profilo di velocità assunto durante l'esercizio. Quest'ultimo, se ottimizzato e comunicato quasi continuamente al macchinista, può comportare una significativa riduzione dei consumi.

A tal proposito, poiché le fasi di accelerazione del convoglio (considerando la tratta da percorrere e l'orario di servizio da rispettare) richiedono un apporto energetico proporzionale all'inerzia al moto, è opportuno definire tale profilo in funzione delle distanze in gioco, al fine di evitare inutili sequenze di fasi di frenatura ed accelerazione, favorendo tratte a velocità costante (livellamento sui valori di velocità minima tra le massime ammesse sulla tratta, soluzione già applicata), e, ove possibile, disalimentando i motori di trazione, al fine di sfruttare le forze di inerzia (fase di *coasting*). A monte di tali misure, è chiaro come un importante contributo sia inoltre dato dalla riduzione delle masse (tare) dei convogli usati.

Appare chiaro come la gestione dell'esercizio ferroviario debba tenere conto di molteplici obiettivi, spesso in contrasto tra loro, come i tempi di percorrenza, il consumo energetico e l'entità del carico da trasportare.

Sebbene la minimizzazione del tempo di viaggio sia stata da tempo un criterio guida sul quale gli operatori ferroviari programmano l'esercizio, in tempi recenti la questione dell'efficienza energetica risulta assumere maggiore importanza (ad esempio, per il conseguimento dei certificati energetici nel trasporto pubblico in Italia), benché i contratti di fornitura siano sovente a *forfait* dunque

cal model. With such assumptions the influence on energy consumptions due to the scheduled travel diagram and to the driving style is evaluated.

Special emphasis is given on the consumption connected to the braking stages and the relevant influence on the maintenance of brakes and wheel-sets, which has a direct economic impact for the transport operators. The role of innovative technological solutions is highlighted.

1. Foreword and objectives of the study

In the last few years, the economic and environmental issues linked to the procurement and management of the resources have emphasised the need to develop more energy-sustainable transport systems. Even though the transport field is prevalently characterised by the use of means depending on distributed energy - i.e. based upon petroleum deriving fuels - the railway results to be the most efficient one as related to consumption, when well exploited. The electrified lines are supplied by electric power stations, irrespectively on the energy source [1].

The energy used in railways for the operation of trains is closely linked to the transported load (i.e. freight or passengers), to the structural and functional characteristics of the rolling stock, to the features of the line (i.e. grades, tortuousness, maintenance conditions of the infrastructure), to the environment conditions as well as to the speed profile adopted during the operation; the latter - if optimised and almost continuously communicated to the driver - may ensure significant savings in consumption.

To this purpose, since the acceleration phases of a train (considering the involved line and the timetable constraints) call for an use of energy depending on the inertia, such profile should be defined as a function of the distance at stake, in order to avoid useless sequences of braking and acceleration, fostering the coverage of sections at constant speed (levelling on the minimum speed values out of the maximum ones allowed on a line stretch, solution already applied) and stopping the motors wherever viable in order to exploit inertia as motive power (coasting stage). Moreover, besides these measures, it is clear how a main contribution is given by the reduction of the masses (tares) of the used rolling stock.

Obviously, the management of the railway service must take into account several objectives, which are often in conflict to one another, such as the coverage time, the energy consumption and the payload to transport.

Even though minimising the travel time is one of the leading criteria through which the railways operators schedule the operation, the issue of energy efficiency seems to have recently taken greater significance (for example, for pursuing energy certificates for public transport in Italy), even though the energy supply contracts are often on a lump-sum basis and therefore weigh little - to date - on the economic policies of the operators [2].

SCIENZA E TECNICA

ad oggi poco influenti sulle politiche economiche aziendali [2].

Diversamente, il passaggio al pagamento a consumo potrebbe avere un impatto sulla progettazione del materiale rotabile, sull'offerta proposta dall'esercente ferroviario (se il kWh fosse costoso potrebbero profilarsi treni a minor consumo, agendo sulle variabili progettuali e di esercizio), sull'impostazione d'orario nonché su altri fattori presumibilmente secondari.

Considerando tale contesto si presenta la sintesi di uno studio inerente all'ottimizzazione della fase di frenatura di convogli ferroviari in condizione di rallentamento od arresto, svolto nell'ambito di una collaborazione tra il Politecnico di Torino e l'azienda Faiveley Transport Italia di Piosasco (Torino), in cui è stato concepito un algoritmo di simulazione della marcia treno, attraverso il programma Matlab, con riferimento a treni passeggeri e merci.

Si è inteso indagare se esistano margini di miglioramento nell'utilizzo del materiale rotabile attraverso un'analisi del profilo di marcia durante l'esercizio e, in particolare, della frenatura, considerando l'impatto indiretto, tutt'altro che trascurabile, sull'usura dei componenti del sistema frenante e l'ottimizzazione dei tempi di percorrenza, attraverso un confronto diretto tra i risultati forniti dal simulatore e i dati reali acquisiti sui convogli stessi.

Contestualmente, si è voluto valutare analiticamente, in funzione di diverse variabili - quali velocità massime e forza di frenatura applicata - come l'impostazione della traccia orario e lo stile di condotta del macchinista, legato talvolta all'esperienza dello stesso, possa influenzare i consumi energetici durante la marcia, con particolare attenzione all'energia dissipata durante le fasi di arresto del convoglio.

E' evidente che una politica di contenimento energetico dovrà essere congruente con un'impostazione delle tracce tale da evitare fermi e strozzature, causa di ritardi nonché di consumi inefficaci. Tale obiettivo non può prescindere da un adeguamento in tempo reale della velocità dei convogli svolta dai centri di controllo della circolazione.

Un tale contributo nel campo dell'impostazione dell'esercizio potrebbe sicuramente contribuire ad un'ulteriore razionalizzazione dei consumi energetici in ambito ferroviario, andandosi ad affiancare ad altri provvedimenti che interessano a vario titolo l'infrastruttura ed il materiale rotabile.

2. Modelli per la valutazione dei consumi energetici in ferrovia: stato dell'arte

I software commerciali di simulazione dell'esercizio ferroviario, nonché i modelli di seguito proposti, si basano sul presupposto che lo spazio percorso da un treno possa essere suddiviso in una sequenza di successivi in-

Differently the adoption of a consumption invoicing could have heavy effects mainly on the rolling stock design, on the service offered by the railway operator (if the kWh were expensive, cheaper trains could be envisaged, featuring less energy consumptions thanks to proper choice of design and operational variables) on the trains scheduling and on other secondary factors as well.

Considering this context, we are presenting part of a study relevant to the optimisation of the braking stage of the trains in slowing-down and stopping conditions which was developed within the framework of a cooperation between the Politecnico di Torino and the company Faiveley Transport Italy of Piosasco (Turin), for which a train running simulation algorithm has been developed - through the Matlab program - as related to passenger and freight trains.

The aim was to investigate whether there were margins for improvement in the use of the rolling stock through an analysis of the running profile during the operation - with particular focus on braking, since its impact on the wear of the components is far from being negligible - and the optimisation of the coverage time, through a direct comparison between the results provided by the simulator and the actual data acquired on the trains.

At the same time, we have intended to run an analytical assessment - as a function to some variables, such as the maximum speed and the braking strength applied - on how the scheduled travel diagram and the driving style, which is sometimes linked to the driver's experience, may influence energy consumption, with special focus the energy which is dissipated during the stopping stages of the train.

It is clear that an energy containment policy needs to be consistent to a setting up of the timetables pathways, in order to prevent downtime and bottlenecks, which would generate delays and unproductive consumption. This aim cannot be disjointed by a real time optimisation of the convoys speed performed by the dispatching centres, which are able to continuously monitor the traffic situation. Such a contribution in the field of the operations scheduling could surely contribute to a further rationalisation of consumptions in the railway field, supporting other interventions regarding infrastructure and rolling stock.

2. Models for the assessment of energy consumption in railways: state of the art

Commercial software packages for railway simulation, as well as the models which are proposed hereunder, are based on the assumption that the space covered by a train can be divided into a sequence of subsequent intervals (which correspond, for instance, to constant speed stretches), each of which is characterised by a given running speed of the trains. If a single space interval is considered, taking into account the max. speed allowed in that section and the performance of the train itself, four stages of motion can be considered, namely: a first stage of acceleration (A) where

SCIENZA E TECNICA

tervalli (corrispondenti a tratte a velocità costante), caratterizzati ognuno da una determinata velocità di marcia per i convogli. Se si considera un singolo intervallo spaziale, tenendo conto della massima velocità consentita in quella sezione e delle caratteristiche del convoglio stesso, è possibile come noto identificare quattro fasi del moto: una prima fase di accelerazione (A) in cui la velocità cresce dal valore nullo a v_{\max} (se il treno riesce a raggiungerla), una fase di regime o *cruising* (Cr) a velocità costante (ed accelerazione nulla), una fase di marcia inerziale o *coasting* (Co), nella quale il treno avanza per mezzo della sua inerzia, ed una fase di frenatura (B) (fig. 1).

Prima di definire lo spazio percorso a regime e a marcia inerziale, è necessario determinare la fase di frenatura al fine di garantire che la distanza necessaria all'arresto non ecceda lo spazio rimanente per giungere alla fine della sezione considerata.

Poiché durante la fase di *coasting* non vi è dispendio energetico, per ridurre il consumo globale all'interno della sezione percorsa, è possibile variare la posizione (o l'istante) in cui disalimentare i motori (punti 1,2,3 di fig. 1): tanto prima inizia tale fase, maggiore sarà il risparmio energetico, ma più lungo sarà il tempo di percorrenza della tratta.

A seconda della distribuzione e della durata di queste fasi nel profilo di marcia di un convoglio, il profilo energetico risultante potrà assumere valori notevolmente differenti, a seconda delle massime velocità raggiunte, della modalità di frenatura, delle caratteristiche di linea e rotabili. Per questo motivo in letteratura è possibile trovare dei range di oscillazione di tali valori sensibilmente estesi: una consultazione bibliografica effettuata presso il Politecnico di Torino [3] ha permesso di individuare, per quanto riguarda il traffico passeggeri effettivo, un intervallo di variazione compreso tra 80 (treno regionale veloce con poche fermate) e 630 (metropolitane, masse elevate e fermate frequenti) kJ/posto-km. Tale differenza è correlata alle prestazioni anche molto diverse del materiale rota-

the speed grows from the null value up to v_{\max} (if the train manages to reach it), a cruising speed (Cr) at constant speed (and null acceleration), a stage of inertial speed or coasting (Co), during which the train moves by its own inertia, and a braking stage (B) (fig. 1).

Before defining the space covered in cruising and coasting, the braking stage needs to be determined in order to ensure that the distance required to stop does not exceed the remaining space to reach the end of the section taken into account.

Since there is no energy consumption during coasting, the position (instant) where the motors need to be deactivated can be changed in order to reduce the overall consumption (items 1,2,3 of fig. 1): the sooner the first initial stage starts, the greater the energy saving will be, but the coverage time of the section shall be longer.

Depending on the arrangement and the duration of these phases in the overall travel diagram of a convoy the resulting energy consumption profile can feature values considerably different, depending on the maximum speeds, on the braking manoeuvre, on infrastructure and rolling stock characteristics. For this reason it is possible to find in literature rather wide oscillation ranges of specific consumptions. A bibliographical review carried on among Politecnico di Torino [3] permitted to identify, as regards passenger actual traffic, a variation interval comprise between 80 (express regional train with few stops) and 630 (undergrounds, high masses and frequent stops) kJ/seat-km. Such a gap is due to the even significant performance differences of the rolling stock as well as to the disparate operational features. Differently for freight transport this interval is comprised between 150 and 380 kJ/t-km. In the case of road passenger transport, as example, the values of the specific energy consumption range between 800 and 3000 kJ/seat-km. The variability of these values is due to the great number of parameters (and their reciprocal configurations) which lead the phenomenon, which cannot be immediately and easily isolated.

In literature several references to methods and models aimed to the analysis of energy consumptions in the railway field are present, focused to their optimisation respecting fixed constraints.

Amongst the models which propose a rationalisation of energy consumption, we point out the study proposed by CHEVRIER R., MARLIÈRE G., RODRIGUEZ J. [4], which is based upon a multi-objective optimisation algorithm - named as evolutionary algorithm - which considers the duration of the itinerary, energy consumption and the travel time prolongations as functions to be minimised. In this way different possible speed profiles are defined, able to represent a support to railway operators - both during infrastructure designing and operations - when selecting the most suitable solution for their requirements, as far as today is possible.

The model was applied to the investigation of a regional French train which covers a section of approx. 20 km be-

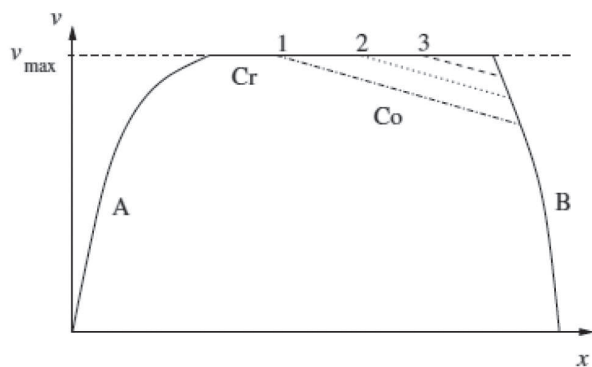


Fig. 1 - Fasi del moto di un convoglio ferroviario in una sezione: accelerazione (A), regime (Cr), marcia inerziale (Co), frenatura (B); sull'asse delle ascisse, x rappresenta lo spazio.

Fig. 1 - Motion stages of a train in a section: acceleration (A), cruising (Cr), coasting (Co), braking (B); x axis represents space.

SCIENZA E TECNICA

bile e alle anche disparate caratteristiche dell'esercizio. Diversamente per il *traffico merci* tale intervallo è risultato compreso tra 150 e 380 kJ/t-km. Nel caso del trasporto passeggeri su gomma, a titolo di esempio, i valori di consumo energetico specifico oscillano tra 800 e 3000 kJ/posto-km. La variabilità di tali valori è da imputare al gran numero di parametri (e loro possibili configurazioni reciproche) che governano il fenomeno, non immediatamente e facilmente isolabili.

In letteratura sono presenti alcuni riferimenti a metodi e modelli tesi all'analisi dei consumi energetici in campo ferroviario ed alla loro ottimizzazione nel rispetto di determinati vincoli. Tra i modelli che propongono una razionalizzazione dei consumi energetici, si segnala quello proposto da CHEVRIER R., MARLIÈRE G., RODRIGUEZ J. [4], basato su un algoritmo di ottimizzazione multi-obiettivo, detto "algoritmo di evoluzione", considerando come funzioni da minimizzare la durata del tragitto, il consumo energetico e gli allungamenti di percorrenza. In tal modo vengono definiti diversi possibili profili di velocità, in grado da fungere da supporto agli operatori ferroviari - sia in fase di gestione dell'infrastruttura sia di esercizio - nella scelta della soluzione più conforme alle loro esigenze, per quanto possibile oggi. Il modello è stato applicato allo studio di un convoglio regionale francese percorrente un tratto di circa 20 km, tra Saint-Etienne e Rive de Giers, con fermata intermedia di un minuto nella stazione di Saint Chamond. A seconda del differente numero di funzioni considerate, sono stati valutati tre casi di ottimizzazione: nel primo, è stata minimizzata solo la funzione "tempo di percorrenza" (ottenendo una soluzione "base"), registrando alti valori dei consumi energetici; nel secondo caso, considerando di ottimizzare sia il tempo di viaggio che i consumi, si è ottenuto un debole incremento dei tempi di percorrenza (minore del 2%) con un risparmio energetico fino al 50% rispetto alla soluzione base, giustificato dal fatto che la pendenza della tratta favorisce alte velocità di marcia senza eccessivi sforzi di trazione.

Nel terzo caso invece, in cui l'obiettivo è stato quello di minimizzare tempi di percorrenza, consumi e ritardi, i tempi di percorrenza sono risultati allungati solo dello 0,78%, con un risparmio energetico complessivo fino al 45%, e con valori molto bassi di incremento dei ritardi (minori dell'8,7%).

A.P. CUCALA, A. FERNÁNDEZ, C. SICRE, M. DOMÍNGUEZ [5] hanno proposto invece un modello basato sulla logica di controllo *fuzzy*, al fine di definire una programmazione dell'esercizio ferroviario che tenga conto sia di una marcia il più sostenibile possibile dal punto di vista dei consumi, sia di un adeguato orario di servizio delle corse. L'aleatorietà dei ritardi rispetto alla tabella di marcia è espressa attraverso valori numerici *fuzzy*, mentre l'ottimizzazione dell'orario è ottenuta tramite un modello di programmazione lineare *fuzzy*, nel quale la funzione obiettivo include sia i consumi degli scenari ipotizzati sia lo stile di condotta del macchinista. E' possibile quindi

tween Saint-Etienne and Rive de Giers, with a 1-minute intermediate stop at the station of Saint Chamond.

According to the different number of functions taken into account, three cases of optimisation have been assessed: in the first one, the sole function of "coverage time" has been minimised (obtaining a "basic" solution), and high values of energy consumption have been recorded; in the second case, where both the travel time and consumption have been optimised, a minor increase in the coverage time (lower than 2%) has been recorded with energy savings up to 50% versus the basic solution, due to the fact that the grade of the section facilitates high running speed without excessive traction efforts.

On the other hand, in the third case - whose objective was to minimise the coverage time, consumption and delays - the coverage time lengthened by 0.78% only, with overall energy savings up to 45%, and with very low values of delay increment (less than 8.7%).

A.P. CUCALA, A. FERNÁNDEZ, C. SICRE, M. DOMÍNGUEZ [5], proposed instead a model based upon the fuzzy control logics in order to define a scheduling of the railway service which takes into account the most possible sustainable driving conditions on the consumption point of view as well as an appropriate service timetable. The aleatory delays versus the schedule are expressed through fuzzy numerical values, whilst the optimisation of the timetable is obtained through a model of fuzzy linear programming, where the target function includes both the consumptions of the assumed scenarios and the driving style. This will therefore allow defining - for each section and for an established coverage time - a set of curves which identify a given driving style, denominated "Pareto curve", representing the style which minimises energy consumption ("ecodriving").

The Pareto curves relevant to every section of the itinerary are obtained through a simulator of the motion equation of the train, integrated by a genetic algorithm (GA): the coverage time and energy consumption values which correspond to the different driving styles have been developed in an algorithm through an interactive process of selection (fig. 2). The model has been applied to the case of the Madrid-Barcelona high speed section, showing that significant energy saving can be achieved through the planning of an efficient timetable, given an approximate knowledge on the delays and time constraints to be complied with for every travel, with a consumption reduction equal to approximately 6.7% versus the current service.

On the other hand, KIM et al. [6] proposed a mathematical model - associated to an heuristic one - for programming the schedules, in order for reducing the energy peaks due to the traction: given an initial scheduling of the travels, they are translated into time to reduce the electrical consumption of the line, even though without taking the delays under consideration.

MALAVASI et al. [7] describe models for estimating of the consumption of an underground line, as well as for assessing of the impact that the energy transfer between trains of

SCIENZA E TECNICA

definire per ogni tratta e per un tempo di percorrenza stabilito, un insieme di curve che identificano un certo stile di guida, individuando una curva ottima, detta "curva di Pareto", la quale rappresenta lo stile che minimizza i consumi energetici ("ecodriving").

Le curve di Pareto relative ad ogni tratta del tragitto sono ottenute da un simulatore dell'equazione del moto del treno, integrato con un algoritmo genetico (GA): i valori dei tempi di percorrenza e dei consumi energetici corrispondenti ai diversi stili di guida sono elaborati nell'algoritmo, attraverso un processo iterativo di selezione (fig. 2). Il modello è stato applicato al caso della linea ad alta velocità spagnola Madrid-Barcellona, dimostrando che possono essere ottenuti significativi risparmi energetici attraverso la programmazione di orari efficienti, data una conoscenza approssimata sui ritardi e dei vincoli d'orario da rispettare per ogni corsa, con una riduzione dei consumi pari a circa il 6,7% rispetto al servizio attuale.

KIM *et al.* [6] hanno invece proposto un modello matematico di programmazione delle tabelle di marcia dei convogli affiancato da un algoritmo euristico, al fine di ridurre i picchi energetici dovuti alla trazione: assegnata una programmazione iniziale delle corse, esse vengono traslate nel tempo al fine di ridurre il consumo elettrico della linea, non tenendo conto tuttavia dei ritardi.

In MALAVASI *et al.* [7] sono descritti modelli di stima dei consumi di una linea metropolitana, nonché di valutazione dell'impatto che il trasferimento di energia tra convogli della linea possa determinare sull'esercizio. Il simulatore proposto potrebbe essere impiegato per sincronizzare le fasi di frenatura e accelerazione al fine di migliorare tale trasferimento.

SICRE *et al.* [8], infine, propongono un metodo per definire modalità di marcia energeticamente sostenibili per linee ad alta velocità implementato su simulatore ed un modello di ottimizzazione delle tabelle di marcia in cui il consumo energetico è minimizzato, trascurando tuttavia il vincolo di puntualità d'orario delle singole corse.

In generale i modelli proposti nei suddetti articoli hanno dimostrato l'effettiva possibilità di risparmiare energia durante l'esercizio dei convogli, con valori medi di risparmio oscillanti tra il 13% e il 21% rispetto ai consumi attuali. Nella seguente trattazione viene proposto un modello di calcolo che prende in considerazione un ristretto numero di parametri significativi (come la massima velocità di linea e la frequenza delle fermate) al fine di disporre di un semplice ed immediato strumento di confronto.

3. Simulazione dell'esercizio di convogli passeggeri sulla linea Torino-Modane

3.1. Caratteristiche della linea

La linea ferroviaria Torino-Modane, nota anche come ferrovia del Frejus, fa parte della linea Torino-Lione

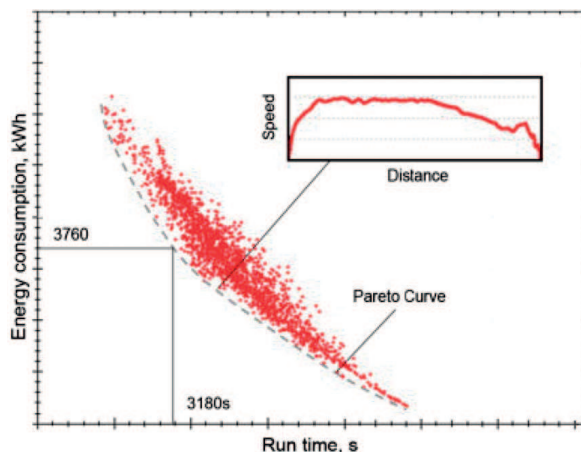


Fig. 2 - Relazione tra consumo energetico e tempi di percorrenza, con individuazione della curva di Pareto per una tratta ferroviaria [5].

Fig. 2 - Relationship between the energy consumption and the run time, with outlining of the Pareto curve for line stretch [5].

the line may determine on the service. The proposed simulator could be used to synchronise the braking and acceleration stages in order to improve such transfer.

Finally, SICRE *et al.* [8] propose a model for defining running modalities which are energetically sustainable for high speed lines implemented on a simulator, and a model of optimisation of the schedules whose energy consumption is minimised, letting out - in any case - the punctuality constraint of the different rides.

In general, the models proposed in the aforementioned articles have shown that energy can actually be saved during the operation of the trains, with average values between 13% and 21% versus the current consumption figures. In the following pages a calculation model is proposed, which takes into consideration a limited number of significant parameters (as the maximum line speed and the stops frequency) in order to have a simple and immediate comparison tool.

3. Simulation of the passenger train operation on the Turin-Modane line

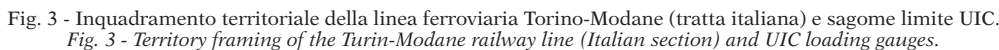
3.1. Characteristics on the line

The Turin-Modane line - also known as the Frejus railway - is part of the Turin-Lyon line, opened in 1871. This is an international line which - leaving from Turin - crosses the valley of Susa and the railway tunnel of Frejus, to reach the French town of Modane (fig. 3).

Once it has crossed the tunnel, the railway management is taken over by the French rail operator and continues towards Chambéry and Lyon. The secondary line "Bussoleno-Susa" (approximately 8 km on a single track, which is electrified and belongs to the RFI complementary network)

starts from Bussoleno. The traffic in transit on the line is characterised by a large number of commuters from Susa, Bussoleno and Avigliana towards Turin, whilst a more touristic international traffic characterises the high valley. As a whole, the line is approximately 103 km long, is fully electrified with double track and provided with a system of coded current automatic block. The mountain section starts in Bussoleno and the two tracks have different layouts and grades: the one which is heading for Bardonecchia runs through a tunnel until Salbertrand, whilst the one in arrival from Bardonecchia is characterised by less tunnel sections and runs at a slightly lower level. From Salbertrand, they then follow the same path. The track headed to Bardonecchia, constructed in recent times, being the one "raising" to the pass, has been designed with a pathway in "S" tunnels, in order to contain the grade, incrementing its extension. Between Bussoleno and Salbertrand, in the intermediate stations, the two tracks are at the same level. Currently, the regional trains which cover this section end in Bardonecchia, whilst - until 2002 - they continued to Modane, before the starting of the loading gauge extension activities for the passage of the container trains, which ended in June 2011. The line is covered by the high-speed train TGV, which performs passenger service between Italy and France, with three pairs of trains/day between Milan Porta Garibaldi and Paris Gare de Lyon, passing by the capital of Piedmont (fig. 4). The freight traffic is rather heavy throughout the day. In particular, it is occupied by the freight trains of the Rolling Road service (named AFA), consisting of very low flat wagons in the central part - or pocket - (Modalohr wagons), where full trucks are loaded, to cross the highest part of the alpine arch. Such trains are provided with a passenger wagon for the transport of the truck drivers. Five pairs of trains per day are currently scheduled between the Turin-Orbassano freight terminal and the French terminal of Aiton, at the end of Val Maurienne.

Oltrepassato il traforo, nella stazione di Modane la ferrovia passa sotto la gestione delle ferrovie francesi e prosegue verso Chambéry e Lione. Da Bussoleno si diparte la linea secondaria "Bussoleno-Susa" (circa 8 km a binario semplice, elettrificato ed appartenente alla rete complementare di RFI). Il traffico transitante sulla linea è caratterizzato da un forte pendolarismo da Susa, Bussoleno e Avigliana verso Torino; un traffico più turistico ed internazionale caratterizza, invece, l'alta valle. La linea è lunga complessivamente circa 103 km, interamente elettrificata, a doppio binario e dotata del sistema di blocco automatico a correnti codificate. La tratta montana inizia a Bussoleno ed i due binari hanno tracciati e pendenze diverse: quello diretto a Bardonecchia corre prevalentemente in galleria fino a Salbertrand, mentre quello in arrivo da Bardonecchia ha meno tratti in galleria e rimane ad una quota leggermente più bassa. Da Salbertrand seguono lo stesso tracciato. Il binario diretto a Bardonecchia, realizzato in tempi più recenti, essendo il binario "di salita" al valico, è stato progettato con un percorso in gallerie a "S" per contenere la pendenza, incrementandone l'estensione. Tra Bussoleno e Salbertrand, nelle stazioni intermedie, i due binari si trovano allo stesso livello. Attualmente i treni regionali che percorrono la tratta terminano a Bardonecchia, mentre fino al 2002 proseguivano verso Modane, prima dell'inizio dei lavori di adeguamento di sagoma della galleria per il passaggio di treni container, conclusi nel giugno 2011. La linea è percorsa dai treni ad alta velocità TGV, che effettuano servizio viaggiatori tra l'Italia e la Francia, con tre coppie di treni/giorno tra Milano Porta Garibaldi e Paris Gare de



SCIENZA E TECNICA

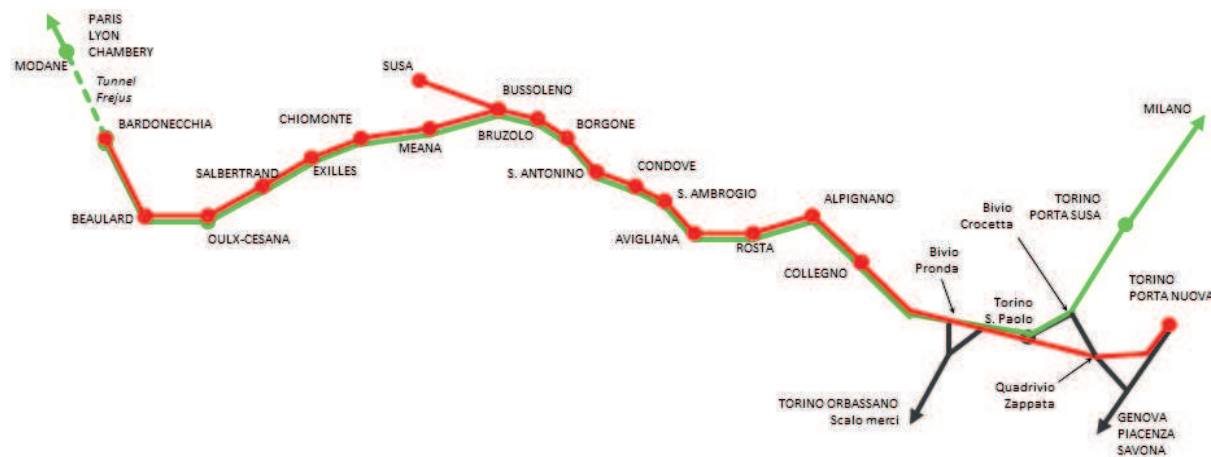


Fig. 4 - Tracciato sintetico e stazioni della linea ferroviaria Torino-Modane. In rosso il percorso dei treni regionali, in verde quello dei treni ad alta velocità, diretti in Francia o da questa provenienti.

Fig. 4 - Schematic track layout and stations of the Turin-Modane railway line. Routing of the regional trains in red and the ones of the high speed trains, headed to France, in green.

Lyon, transitando per il capoluogo piemontese (fig. 4). Il traffico merci è piuttosto sostenuto lungo la giornata. In particolare, vi transitano i treni merci del servizio Autostrada viaggiante (AFA, Autostrada Ferroviaria Alpina), composti da carri con pianali molto bassi nella parte centrale o vasca (carri Modalohr), sui quali vengono caricati camion completi per l'attraversamento della parte più elevata del valico alpino. Tali treni sono muniti anche di una carrozza viaggiatori per il trasporto dei conducenti. Attualmente sono previste cinque coppie di treni/giorno, tra lo scalo merci di Torino-Orbassano e lo scalo francese di Aiton, al termine della Val Maurienne.

Il punto più elevato del tracciato è a 1.338 m, all'interno del traforo del Frejus, la pendenza massima è del 28‰, e le sagome delle gallerie (quasi tutte A+ o B) hanno una larghezza di 2,72 m ed un'altezza di 3,96 o 4,11 m. Dal 2011 la galleria ha subito l'adeguamento alla sagoma UIC GB1 consentendo oggi il trasporto di unità di trasporto intermodali di profilo PC45 anziché del solo PC30⁽¹⁾.

3.2. Materiale rotabile e rilevazione dei dati

Oggetto iniziale del lavoro è stato quello di acquisire dati inerenti ad accelerazioni, velocità e posizione a bordo di treni in servizio: si è scelto di effettuare rilievi sia su un convoglio regionale Torino Porta Nuova-Bardonecchia, sia su un treno TGV in viaggio tra Torino Porta Susa e Modane (diretto a Parigi), sia sul percorso di andata

The highest point of the layout is at 1,338 m, within the tunnel Frejus. The max. grade is 28‰, and the loading gauges of the tunnels (almost all of them A+ or B) have a width of 2.72 m and a height of 3.96 or 4.11 m. Since 2011 the tunnel has been upgraded to the loading gauge UIC GB1, allowing therefore the transport of intermodal transport units with gabarit PC45 instead of PC30⁽¹⁾.

3.2. Rolling stock and data collection

The initial aim of the work was the acquisition of data relevant to accelerations, speed and position on board trains of trains on service: we have selected surveys to be performed on both a regional train from Turin's station of Porta Nuova to Bardonecchia and on a TGV train traveling between Turin Porta Susa and Modane (and heading to Paris), on both ways.

Table 1 reports the distances in kilometres and the relevant stop times⁽²⁾ in the intermediate stations for both trains [9].

The regional train taken into account and managed by

⁽¹⁾ Rolling stock with a loading gauge wider than PC45 cannot travel on Italian, French and Spanish lines, which allow only smaller gabarits (from PC22 up to PC45, with very few exceptions).

⁽²⁾ In Bardonecchia (I) the regional train dwelled for 36' for letting travelling personnel have a break and for allowing the inversion of the driving bench (from the locomotive to opposite pilot-coach). In Modane (F), during the measurements on TGV, it has been necessary to wait for the first train bound to Torino (I) arriving from Lyon-Paris. For this reason the pause has been equal to 2 hours and 45' [18].

⁽¹⁾ I mezzi di profilo maggiore del PC45 non possono transitare sulle linee italiane, francesi e spagnole, compatibili solo con profili inferiori (dal PC45 al PC22 tranne pochissime eccezioni) [17].

SCIENZA E TECNICA

TABELLA 1 – TABELLA 1

Chilometriche e tempi di sosta alle fermate dei treni regionali Torino P.N.-Bardonecchia-Torino P.N.
e TGV Torino P.S.-Modane-Torino P.S.[18]
*Distance in km and stop time of the regional trains Turin P.N.-Bardonecchia-Turin P.N.
and TGV Turin P.S.-Modane-Torino P.S. [18]*

Stazione Station	km	t fermata (min) stop time (min)	Stazione Station	km	t fermata (min) stop time (min)
Torino PN	0	0	Torino PS	0	0
Collegno	10	1	Collegno	11	0
Alpignano	14	1	Alpignano	15	0
Rosta	19	1	Rosta	20	0
Avigliana	24	1	Avigliana	25	0
Bussoleno	46	1	Bussoleno	46	0
Meana	53	1	Meana	54	0
Chiomonte	59	1	Chiomonte	60	0
Salbertrand	69	1	Salbertrand	70	0
Oulx Cesana	75	1	Oulx Cesana	76	1
Beaulard	81	1	Beaulard	82	0
Bardonecchia	86	pausa/pause	Bardonecchia	87	11
Beaulard	91	1	Modane	106	pausa/pause
Oulx Cesana	97	1	Bardonecchia	125	11
Salbertrand	103	1	Beaulard	130	0
Chiomonte	113	1	Oulx Cesana	136	1
Meana	120	1	Salbertrand	141	0
Bussoleno	127	1	Chiomonte	152	0
Avigliana	148	1	Meana	158	0
Rosta	153	1	Bussoleno	166	0
Alpignano	158	1	Avigliana	187	0
Collegno	163	1	Rosta	192	0
Torino PN	172	0	Alpignano	197	0
			Collegno	202	0
			Torino PS	211	0

che su quello di ritorno. Nella tabella 1 sono indicate le progressive chilometriche ed i relativi tempi di sosta⁽²⁾ nelle stazioni intermedie per entrambi i convogli [9].

Il convoglio regionale preso in esame è gestito da Trenitalia è composto da una locomotiva di tipo E464 e 4 carrozze a due piani tipo 1979, delle quali una semi-pilo-

Trenitalia consists of a locomotive of type E464 and 4 two-floor wagons of type 1979, one of which is a semi-pilot for remote control of the locomotive [10]. The nameplate data are reported in table 2.

The high speed train taken into consideration is a TGV by SNCF which covers the Turin – Modane line, a section of the Milan-Lyon-Paris. It consists of a multi-current TGV Réseau built in 1993-1996, composed by two locomotives (one at the head and one at the tail) and 8 wagons, according to composition T-Ra1-R1-R1-B-R2-R2-R2-Ra2-T with running gear Bo'Bo'+Bo'2'2'2'2'2'2'Bo'+Bo'Bo. The nameplate data of the train are reported in table 3.

Regarding the regional train, three “test rides” have been performed with recording of travel data, respectively on

⁽²⁾ A Bardonecchia il treno regionale si è fermato per 36' per sosta del personale di bordo e inversione banco di manovra (da locomotiva a semipilota). A Modane, durante le rilevazioni sul TGV si è atteso il primo convoglio di ritorno in direzione Torino proveniente da Lione-Parigi. Per questo motivo la sosta è stata di 2 ore e 45' [18].

SCIENZA E TECNICA

ta per guida in telecomando della locomotiva [10]. I dati di targa del treno sono riportati nella tabella 2.

Il convoglio ad alta velocità preso in considerazione è un TGV di SNCF che percorre la linea Torino-Modane, tratto della Milano-Lione-Parigi. Il treno è composto da un *TGV Réseau* policorrente di costruzione 1993-1996, composto da 2 locomotive (poste in testa ed in coda al convoglio) e da 8 vagoni, secondo la composizione T-Ra1-R1-R1-B-R2-R2-R2-Ra2-T con rodiggio Bo'Bo'+Bo'2'2' 2'2'2'2'Bo'+Bo'Bo. I dati di targa del treno sono riportati nella tabella 3.

Per quanto riguarda il treno regionale sono state effettuate tre "corse test" con registrazione dei dati di marcia rispettivamente il 16 marzo, il 6 maggio ed il 2 giugno 2011, facendo uso dei medesimi convogli sia per il viaggio di andata che per quello di ritorno. Nella seconda prova, effettuata in maggio, il convoglio monitorato era composto da carrozze a singolo piano invece che a doppio piano. La locomotiva è risultata sempre ubicata all'estremità "lato Bardonecchia" del convoglio, con la carrozza semi-pilota all'estremità opposta verso Torino. Per il treno ad alta velocità, invece, è stata effettuata una sola corsa test il 16 settembre, con il medesimo convoglio sia all'andata che al ritorno.

La strumentazione utilizzata ha compreso un accelerometro ad alta precisione, un accurato rilevatore GPS e una centralina *vbox* per l'acquisizione dei dati, tutti installati presso un posto passeggeri durante i test su TGV e convoglio regionale. In quest'ultimo caso, durante il viaggio di ritorno in direzione Torino, la strumentazione è stata posta in prossimità della cabina della carrozza pilota, avendo modo di osservare le operazioni del macchinista. Entrambi gli strumenti di rilevazione sono stati vincolati tramite un magnete al supporto del sedile lato finestrino: tale posizione, più elevata rispetto al pavimento della carrozza, ha consentito una migliore ricezione del segnale satellitare (questo perché erano presenti meno oggetti schermanti quali sedili, tavolini, fiancate laterali del treno) e dunque migliorando la performance degli stessi garantendo minor errore su accelerazione, velocità e posizione. Il segnale GPS è stato infatti assente solo nelle gallerie mentre l'accelerometro non ha segnalato disturbi in frequenza o spostamenti anomali dovuti ad un'eventuale incorretta installazione.

TABELLA 2 – TABLE 2

Dati di targa del treno regionale con locomotiva E464^(*)
Nameplate data of the regional train with locomotive E464^(*)

Massa totale carrozze <i>Total mass of the wagons</i>	172	t
Massa totale del treno <i>Total mass of the train</i>	244	t
Massa del locomotore <i>Mass of the locomotive</i>	72	t
Massa frenata totale carrozze <i>Total braked mass of the wagons</i>	212	t
Massa frenata totale del treno <i>Total braked mass of the train</i>	277	t
Massa frenata del locomotore <i>Braked mass of the locomotive</i>	65	t
Coefficiente di resistenza al rotolamento <i>Coefficient of rolling resistance</i>	2	N/kN
Coefficiente masse rotanti per le carrozze <i>Coefficient of the rotating masses for the wagons</i>	1,04	-
Coefficiente masse rotanti per le locomotive <i>Coefficient of the rotating masses for the locomotives</i>	1,06	-
Percentuale di massa frenata <i>Percentage of the braked weight</i>	115%	-
Potenza continuativa alle ruote <i>Continuous power to the wheels</i>	3500	kW
Peso totale carrozze <i>Total weight of the wagons</i>	1687	kN
Peso totale del treno <i>Total weight of the train</i>	2393	kN
Peso della locomotiva <i>Weight of the locomotive</i>	706	kN

^(*) Ottenuti da documenti ufficiali per l'esercizio su gentile concessione del personale di Trenitalia a bordo treno [11], [12], [13].

^(*) These data have been obtained from official document for the service by courtesy of the Trenitalia personnel on board the train and from the FS specifications of components for Locomotive E464 by Faiveley Transport Italia [11], [12], [13].

March 16th, May 6th, and June 2nd 2011 with the same trains on both traveling directions. During the second test, the monitored convoy was composed by single floor wagons instead of double floor ones. The locomotive has always been in towing position towards Bardonecchia, with the semi-pilot in the opposite side towards Turin. As related to the high speed train, only one test drive was performed on September 16th, with the same train on both ways.

The instruments utilised included a high precision accelerometer, an accurate GPS detector and a *vbox* unit for data logging, all of them installed on a passenger seat during the test on the TGV on the regional train. In this latter case during the backward journey towards Turin the equipment was placed close to the cabinet of the pilot wagon thus having the opportunity to observe the operations of the driver. The measure instruments were attached by a magnet to the seat support, window side. This position, raised from the wagon floor, has ensured a better downlink

SCIENZA E TECNICA

3.3. Simulazione

Lo strumento di simulazione sviluppato si compone di un algoritmo di calcolo (sviluppato in MATLAB) che, partendo dai dati di targa del treno e dalle caratteristiche della linea ferroviaria, utilizza le equazioni del moto, per calcolare gli spazi di frenatura, le forze necessarie a rallentare o fermare il treno e le energie dissipate, ottimizzando le velocità di percorrenza ammesse dai fascicoli di linea e le decelerazioni che l'impianto frenante può consentire. Per la creazione del simulatore sono state implementate le funzioni per generare le curve di frenatura e trazione per entrambi i tipi di convogli considerati. Sostanzialmente il programma calcola ogni secondo e per ogni metro di avanzamento lo spazio di frenatura rispettando i limiti di velocità. Per la tratta in oggetto sono stati caricati percorso e caratteristiche della linea. Nel programma principale sono state inserite le funzioni e le variabili di frenatura, con tipologia *reostatica* e *a recupero*.

Per le resistenze ordinarie all'avanzamento si è utilizzata nel calcolo la formula binomia di ERFURT [15] per valutare le resistenze specifiche al moto dei convogli, tenendo presente che le velocità in gioco (minori di 155 km/h) non permettono di valorizzare la ridotta resistenza specifica al moto che un TGV – se confrontato con un treno regionale – rivelerebbe alle alte velocità.

$$R_{rot} = rr \cdot \frac{P_{convoglio}}{1000} = (2,4 + 0,00077 \cdot v^2) \cdot \frac{P_{convoglio}}{1000} \quad (II)$$

in cui

- R_{rot} è la resistenza al rotolamento espressa in N;
- rr è la resistenza specifica al rotolamento espressa in N/kN ovvero in kg/t;
- $P_{convoglio}$ è il peso del convoglio espresso in N;
- v è la velocità del convoglio espressa in km/h;

Si è successivamente realizzata una matrice in codice MATLAB (tab. 4) con le seguenti colonne:

- 1) chilometrica (convertita in metri);
- 2) corrispondenza o meno di stazione o fermata con interruttore on-off (0-1) per indicare al simulatore di iniziare a rallentare per arrestare il convoglio;
- 3) altitudine o quota della linea (in metri);

TABELLA 3 – TABELLA 3

Dati di targa del treno alta velocità TGV^(*)
Nameplate data of the TGV high speed train^(*)

Massa totale carrozze <i>Total mass of the wagons</i>	256	t
Massa totale del treno <i>Total mass of the train</i>	386	t
Massa del locomotore <i>Mass of the locomotive</i>	130	t
Massa frenata totale carrozze <i>Total braked mass of the wagons</i>	425	t
Massa frenata totale del treno <i>Total braked mass of the train</i>	561	t
Massa frenata del locomotore <i>Braked mass of the locomotive</i>	136	t
Coefficiente di resistenza al rotolamento <i>Coefficient of rolling resistance</i>	2	N/kN
Coefficiente masse rotanti per le carrozze <i>Coefficient of the rotating masses for the wagons</i>	1,08	-
Coefficiente masse rotanti per le locomotive <i>Coefficient of the rotating masses for the locomotives</i>	1,08	-
Percentuale di peso frenato <i>Percentage of the braked weight</i>	135%	
Potenza continuativa alle ruote <i>Continuous power to the wheels</i>	8800	kW
Peso totale carrozze <i>Total weight of the wagons</i>	2511	kN
Peso totale del treno <i>Total weight of the train</i>	3787	kN
Peso del locomotore <i>Weight of the locomotive</i>	1275	kN

^(*) Ottenuti da documenti ufficiali per l'esercizio su gentile concessione del personale di SNCF a bordo treno [14].

^(*) These data have been obtained by official service documents provided by courtesy of the SNCF personnel on board the train [14].

of the satellite signal (because of the absence of shielding objects like seats, tables, coach side walls), therefore improving the performance of the tools and allowing for lower errors on acceleration, speed and position. The GPS signal was absent in the tunnels only, whilst the accelerometer did not signal any frequency disturbances or anomalous reading due to a possible un-appropriate installation.

3.3. Simulation

The simulator tool developed is constituted by a calculation algorithm (developed in MATLAB) which - starting from the nameplate data of the train and from the characteristics of the railway line - makes use of the motion equations in order to calculate the braking spaces, of the strengths required to slow down or stop the train and the dissipated energy, thus optimising the running speed allowed by the line sections and the deceleration the braking system can allow. In the creation of the simulator, the func-

SCIENZA E TECNICA

- 4) velocità massima in km/h da mantenere entro la chilometrica corrispondente;
- 5) tempo di fermata per soste previste espresso in secondi;
- 6) pendenza della linea (livelletta in ‰).

tions for the braking and traction curves have been implemented for both the regional and high speed trains. The simulator calculates the braking space for each second and for every run meter, respecting the speed limits. The routing and the features of the line were loaded for the studied sec-

TABELLA 4 – TABLE 4

CONVOGLIO REGIONALE - REGIONAL TRAIN	CONVOGLIO ALTA VELOCITÀ - HIGH SPEED TRAIN
% Torino - Bardonecchia disp ('tracciato - routing Torino - Bardonecchia') TT=[0 0 240.0 30 0 0; 1092 1 247.6 30 0 7; 2368 1 261.7 95 0 11; 3179 1 270.6 155 0 11; 3924 1 278.8 155 0 11; 6480 1 283.9 155 0 2; 7496 1 285.9 155 0 2; 9794 0 302.0 150 60 7; 14011 0 331.5 105 60 11; 19229 0 388.9 135 60 1; 21368 1 391.1 155 0 0; 24104 0 391.1 155 60 -10; 27727 1 354.9 155 0 6; 31313 1 376.4 155 0 1; 34564 1 379.6 155 0 4; 38097 1 393.8 155 0 22; 40946 1 456.4 155 0 -4; 44837 1 440.9 95 0 -4; 45534 0 438.1 95 60 30; 47261 1 489.9 105 0 30; 52891 0 658.8 105 60 14; 59465 0 750.8 105 60 21; 65438 1 876.3 105 0 31; 66544 1 910.5 105 0 46; 67640 1 961.0 105 0 46; 69177 0 1031.7 105 60 46; 69828 1 1061.6 85 0 11; 73368 1 1100.5 130 0 11; 75116 0 1119.8 60 60 5; 80926 0 1148.8 100 60 31; 86199 0 1312.3 80 216031; 91472 0 1148.8 100 60 31; 97282 0 1119.8 60 60 5; 99030 1 1100.5 130 0 11; 102570 1 1061.6 85 0 11; 103221 0 1031.7 105 60 46; 104758 1 961.0 105 0 46; 105854 1 910.5 105 0 46; 106960 1 876.3 105 0 31; 112933 0 750.8 105 60 21; 119507 0 658.8 105 60 14; 125137 1 489.9 105 0 30; 126864 0 438.1 95 60 30; 127561 1 440.9 95 0 -4; 131452 1 456.4 155 0 -4; 134301 1 393.8 155 0 22; 137834 1 379.6 155 0 4; 141085 1 376.4 155 0 1; 144671 1 354.9 155 0 6; 148294 0 391.1 155 60 -10; 151030 1 391.1 155 0 0; 153169 0 388.9 135 60 1;	% Torino - Modane disp ('tracciato - routing Torino - Modane') TT=[0 0 240.0 30 0 0; 1092 1 247.6 30 0 7; 2368 1 261.7 95 0 11; 3179 1 270.6 155 0 11; 3924 1 278.8 155 0 11; 6480 1 283.9 155 0 2; 7496 1 285.9 155 0 2; 9794 1 302.0 150 0 7; 14011 1 331.5 105 0 11; 19229 1 388.9 135 0 1; 21368 1 391.1 155 0 0; 24104 1 391.1 155 0 -10; 27727 1 354.9 155 0 6; 31313 1 376.4 155 0 1; 34564 1 379.6 155 0 4; 38097 1 393.8 155 0 22; 40946 1 456.4 155 0 -4; 44837 1 440.9 95 0 -4; 45534 1 438.1 95 0 30; 47261 1 489.9 105 0 30; 52891 1 658.8 105 0 14; 59465 1 750.8 105 0 21; 65438 1 876.3 105 0 31; 66544 1 910.5 105 0 46; 67640 1 961.0 105 0 46; 69177 1 1031.7 105 0 46; 69828 1 1061.6 85 0 11; 73368 1 1100.5 130 0 11; 75116 0 1119.8 60 60 5; 80926 1 1148.8 100 0 23; 86199 0 1270.1 80 720 31; 87793 1 1319.5 85 0 1; 88368 1 1320.1 85 0 1; 93556 1 1325.3 85 0 1; 93583 1 1325.3 85 0 0; 98368 1 1325.3 110 0 0; 100513 1 1325.3 110 0 0; 104916 0 1325.3 30 10020 0; 109319 1 1325.3 75 0 0; 111464 1 1325.3 110 0 0; 116249 1 1325.3 110 0 0; 116276 1 1325.3 110 0 -1; 121464 1 1320.1 85 0 -1; 122039 1 1319.5 85 0 -31; 123633 0 1270.1 80 720 -23; 128906 1 1148.9 100 0 23; 134716 0 1119.8 60 60 5; 136464 1 1100.6 130 0 11; 140004 1 1061.6 85 0 11; 140655 1 1031.7 105 0 46; 142192 1 961.0 105 0 46; 143288 1 910.6 105 0 46;

(continua)

SCIENZA E TECNICA

158387 0 326.3 105 60 12; 162604 0 301.0 150 60 6; 164902 1 298.7 155 0 1; 165918 1 289.6 155 0 9; 168474 1 264.0 155 0 10; 169219 1 256.6 155 0 10; 170030 1 248.5 95 0 10; 171306 1 240 30 0 7; 172398 0 240 30 0 0]	144394 1 876.3 105 0 31; 150367 1 750.9 105 0 21; 156941 1 658.8 105 0 14; 162571 1 489.9 105 0 30; 164298 1 438.1 95 0 30; 164995 1 440.9 95 0 -4; 168886 1 456.5 155 0 -4; 171735 1 393.8 155 0 22; 175268 1 379.6 155 0 4; 178519 1 376.4 155 0 1; 182105 1 354.9 155 0 6; 185728 1 391.1 155 0 -10; 188464 1 391.1 155 0 0; 190603 1 389.0 135 0 1; 195821 1 326.4 105 0 12; 200038 1 301.1 150 0 6; 202336 1 298.8 155 0 1; 203352 1 289.6 155 0 9; 205908 1 264.1 155 0 10; 206653 1 256.6 155 0 10; 207464 1 248.5 95 0 10; 208740 1 240 30 0 7; 209832 0 240 30 0 0];
--	---

Tab. 4 - Matrici in codice MATLAB per la simulazione della marcia dei convogli ferroviari.
Tab. 4 - MATLAB code matrixes for the simulation of the trains.

3.4. Analisi dei dati e confronto

Utilizzando l'algoritmo proposto è stato possibile analizzare i profili di marcia e ricavarne le seguenti osservazioni.

Per il convoglio regionale Torino-Bardonecchia e viceversa, comprese le fermate nelle stazioni e le soste - a Bardonecchia per inversione del banco di manovra e pausa tecnica - si è registrato in viaggio un tempo totale di percorrenza pari a 148 minuti, mentre il simulatore ha fornito come dato di output circa 122 minuti, con una discrepanza di 26 minuti.

Il simulatore ha permesso di verificare come sarebbe possibile ottenere curve di frenatura ottimizzate anche con velocità massime superiori costantemente ai 120 km/h. Questa velocità è stata presa come riferimento poiché si è misurato che il convoglio non supera i 120 km/h anche se in alcuni tratti sono ammesse da fiancata di linea velocità massime di 155 km/h. Questo fatto è dovuto a limitazioni caratteristiche di quella linea, come pendenza e fermate ed all'organizzazione dell'orario. Un fattore importante da valutare sono le numerose e ravvicinate fermate intermedie di 1-2 minuti tra Torino e Bardonecchia (eccezion fatta per il tratto di 20 km tra Avigliana e Bussoleno) che non consentono al convoglio di mantenere a lungo la massima velocità di linea, anzi impongono la riduzione della stessa per motivi di compatibilità con l'orario programmato (allungamenti di percorrenza) e riduzione dei consumi energetici.

Dal punto di vista delle energie dissipate, si osserva come siano maggiori quelle valutate dal simulatore poiché esso imposta la marcia alla massima velocità di fian-

tion. The braking functions and variables were introduced with rheostat and recovery typology.

As related to the ordinary motion resistances, the ER-FURT's binomial formula [15] was used to assess the specific resistance to the motion of the trains, taking into account that the involved speeds (less than 155 km/h) do not allow to valorise the reduced specific motion resistance that a TGV – if compared to a regional train – would feature at higher speeds.

$$R_{rot} = rr \cdot \frac{P_{train}}{1000} = (2,4 + 0,00077 \cdot v^2) \cdot \frac{P_{train}}{1000} \quad (II)$$

where

- R_{rot} is the rolling resistance expressed in N;
- rr is the specific rolling resistance expressed N/kN or kg/t;
- P_{train} is the weight of the train expressed in N;
- v is the speed of the train expressed in km/h.

Then, a matrix has been generated in MATLAB code (tab. 4) with the following columns:

- 1) km (converted into meters);
- 2) correspondence or non-correspondence of the station or stop by on-off (0-1) switch to indicate the simulator to start slowing-down the train;
- 3) altitude of the line (in meters);
- 4) max. speed in kmph to be kept within the corresponding kilometres;
- 5) stop time for expected stops, expressed in seconds;
- 6) line grade (slope in ‰).

SCIENZA E TECNICA

cata e durante la frenatura segue delle curve di decelerazione limite generate, a partire da una certa velocità iniziale, considerando una decelerazione costante assunta come la massima che il treno può sviluppare in condizioni normali (in maniera analoga alla logica di bordo di sistemi con SCMT o ETCS). Diversamente nella realtà il macchinista migliora la prestazione energetica anticipando la frenatura o introducendo significative fasi di *coasting*.

In figg. 5 e 6 sono riportati i profili di velocità (in km/h) e di energia consumata (kJ/m) durante la marcia ottenuti tramite simulazione e quelli elaborati a partire dal profilo di velocità misurato sperimentalmente, insieme con il corrispondente profilo di velocità simulato e rilevato. In questo modo per ciascuna posizione x assunta dal treno durante il viaggio si possono confrontare la velocità ed il corrispondente consumo energetico, sia reali che simulati. La differenza tra i consumi energetici misurati e quelli simulati (dunque quelli corrispondenti ad un completo sfruttamento delle prestazioni di linea e rotabili) è risultata oscillare tra il 5% ed il 13%. In particolare, il profilo simulato risulta essere costantemente in anticipo su quello misurato in primo luogo in quanto presenta, mediamente, accelerazioni e decelerazioni più acute, ed in secondo luogo poiché il profilo reale presenta delle frenature intermedie non in corrispondenza di fermate in

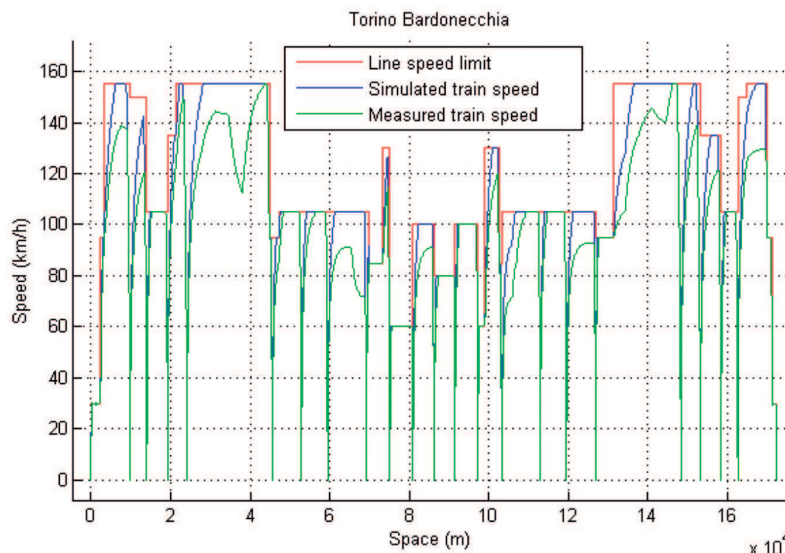


Fig. 5 - Profili di velocità misurati e simulati sul treno regionale Torino-Bardonecchia con le indicazioni sui limiti di velocità di fiancata.

Fig. 5 - Measured and simulated speed profiles of the Turin-Bardonecchia regional train against the line speed limits.

3.4. Data analysis and comparison

The same algorithm has allowed analysing the running diagrams and obtaining the following observations.

For the regional train from Turin to Bardonecchia and returns - including the stops at the stations and other stops (in Bardonecchia for reversal of the master controller and technical break) - the total coverage time recorded during the travel was equal to 148 minutes, whilst the simulator supplied as an output approximately 122 minutes, i.e. a 26-minute discrepancy.

The simulator also allowed verifying to which extent optimum braking curves could be achieved also at max. speeds consistently higher than 120 km/h. This speed has been taken as a reference since it has been measured that the convoy never exceeded 120 km/h even if on certain stretches it could be possible to achieve maximum speeds equal to 155 km/h. This is due to limitations characteristic of that line, such as the slopes, the frequency of the stops and to the timetable organisation.

A significant factor to be taken into consideration are the numerous, close intermediate stops of 1 to 2 minutes between Turin and Bardonecchia (with the exception of the 20 km section between Avigliana and Bussoleno), which do not allow the train to keep the maxi-

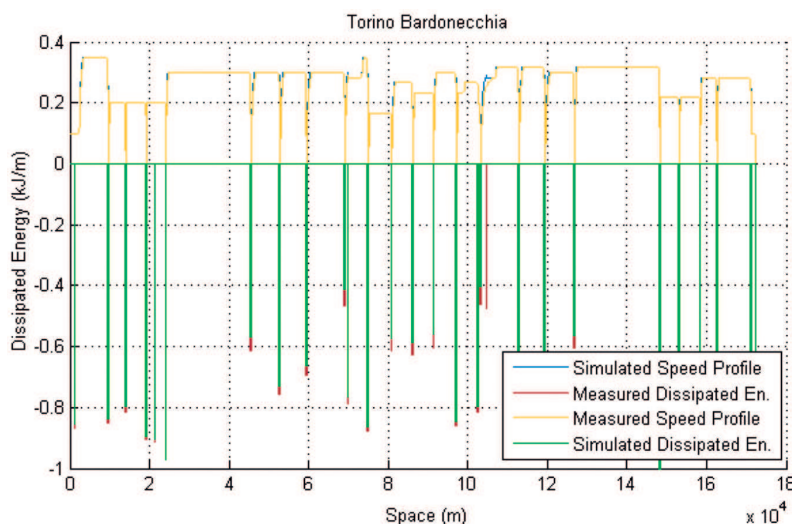


Fig. 6 - Energia dissipata in frenatura per il treno regionale Torino-Bardonecchia (sezione Bussoleno-Bardonecchia).

Fig. 6 - Energy dissipated in braking along the travel for the Turin-Bardonecchia regional train (Bussoleno-Bardonecchia section).

SCIENZA E TECNICA

stazione, dovute a segnali a via impedita. Di fatto il simulatore porta il treno alla velocità massima permessa sulla linea, mentre in realtà il macchinista si mantiene abbondantemente sotto tale limite.

In fig. 7 è altresì riportato il profilo della forza di frenatura al variare della posizione x del convoglio. Si rileva come il simulatore impieghi mediamente circa il 20% in più della forza effettivamente impiegata dal macchinista nella realtà. Tale valore è stato calcolato a partire dai profili misurati di velocità e accelerazione, ed andando a stimare, in corrispondenza di ciascuna decelerazione risultante, i contributi dovuti alle resistenze all'avanzamento e quelli dovuti invece all'effettiva applicazione di una forza di frenatura (considerando la percentuale di massa frenante).

Per il treno ad alta velocità Torino-Modane si è registrato a bordo un tempo di viaggio pari a 89 minuti, leggermente minore rispetto a quello calcolato tramite simulatore, pari a 95 minuti, con una differenza percentuale del 6%.

Anche in questo caso, grazie al simulatore, si è verificato come sarebbe possibile avere curve di frenatura ottimizzate rispetto al tempo di percorrenza anche con velocità superiori costantemente ai 130 km/h, per avvicinarsi ai 155 km/h consentiti dalla linea. Un fattore importante da valutare rispetto al caso del treno regionale sono le sole 2 fermate intermedie tra Torino e Modane di circa 1-2' a Oulx e Cesana [9] e quella più lunga di Bardonecchia.

Analizzando l'energia di frenatura consumata dal convoglio Torino-Modane si è osservato come anche in questo caso sia maggiore quella calcolata dal simulatore poiché, come anticipato, esso ignora ogni fase sia di *coasting*

num line speed for a long time and - mainly - dictate its reduction for reasons of compatibility with the scheduled timetable and energy consumptions reduction.

As related to the dissipated energies, it is worth noticing that the value assessed by the simulator are greater since it set the run at the max line speed and during braking it follows "limit" deceleration curves generated, starting from a certain initial speed, considering a constant deceleration assumed as the maximum one that the train can feature in regular conditions (similarly to the on-board logic of systems like SCMT or ETCS). Differently in reality the driver improve the energy performance anticipating the braking or introducing significant coasting phases.

Fig. 5 and 6 display the speed (km/h) and the energy consumption (kJ/m during the run) profiles obtained from the simulation and those provided by the elaboration of the experimental speed profile, together with the corresponding speed profile, both simulated and measured. In this way for each position x of the train during its run it is possible to compare speed and energy consumption, both real and simulated. The difference between the energy consumptions measured and simulated (therefore those which corresponds to a complete exploitation of the performances of infrastructure and rolling stock) oscillates between 13% and 5%. In particular, the simulated profile appears to anticipate constantly the measured one, first of all because it presents, on average, sharper accelerations and decelerations. Subsequently the measured speed profile presents intermediate braking not only for station stops, due to red block signals. Actually, the simulator "drives" the train up to the maximum speed admitted on the line, while in reality the driver keeps a velocity significantly smaller than such limit.

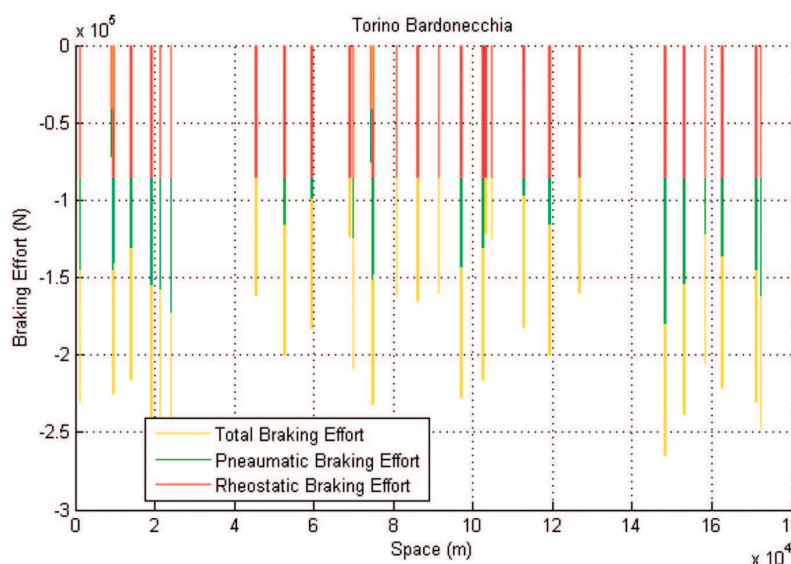


Fig. 7 - Forza di frenatura applicata lungo il viaggio per il treno regionale Torino-Bardonecchia.

Fig. 7 - Braking effort applied along the travel for the Turin-Bardonecchia regional train.

Moreover fig. 7 shows the braking effort profiles versus the train position x . It can be noticed how the simulator employs on average about the 20% more than the effort actually used by the driver in the reality. This value has been obtained starting from the measured speed and acceleration profiles, then calculating, during each resulting deceleration, the contributions of the motion resistances and those caused by an actual application of a braking effort (considering the percent of braking masses).

As related to the Turin-Modane high speed train, the recorded travel time is equal to 89', i.e. slightly lower than the one which was calculated through the simulator (95'), with a percentage difference of 6%.

Also in this case, the simulator allowed ascertaining that optimum braking curves with respect to the running time can be obtained also at speeds which are consistently higher than 130

SCIENZA E TECNICA

sia di frenatura moderata. La differenza tra i consumi energetici calcolati dal simulatore e quelli misurati è risultata oscillare tra il 3 ed il 10%. Analoga tendenza si ritrova per quanto riguarda le forze di frenatura: il simulatore infatti prevede una forza mediamente circa 10% più elevata di quanto elaborato a partire dai dati sperimentali rilevati sul treno.

Per concludere questa prima parte si riportano alcune considerazioni qualitative. Infatti si evince come la velocità massima della linea non sia sfruttata completamente e la velocità media complessiva si aggiri attorno alla metà di quella massima consentita dall'infrastruttura. Se per il treno regionale, il cui orario prevede un alto numero di fermate intermedie, il confronto tra le due velocità ha pochissimo significato, nel caso del TGV (il quale ferma solo a Torino, Oulx-Cesana, Bardonecchia e Modane) si può identificare un non pieno sfruttamento delle caratteristiche dell'infrastruttura e delle potenzialità del materiale rotabile utilizzato. Altro parametro di valutazione sono i tempi di percorrenza: anche ammettendo i limiti di accuratezza del simulatore adoperato, esso individua una possibilità di risparmio di circa 25' (tenendo conto delle norme di sicurezza imposte da SCMT e di eventuali vincoli d'orario dovuti all'interazione con altri convogli) di tempo totale di percorrenza sui 170 minuti complessivi tra andata e ritorno per il convoglio regionale. Diversamente per quanto riguarda il treno TGV, il margine di miglioramento è intorno al 5% considerando la velocità massima percorribile sulla linea. Energeticamente, considerate le ripetute e frequenti frenature dei treni regionali durante il viaggio, l'adozione di sistemi di *frenatura elettrica rigenerativa* potrebbe comportare sensibili economie sui consumi. Infatti sarebbe possibile impiegare l'energia così rigenerata per l'alimentazione di convogli nel frattempo in accelerazione o comunque in trazione, magari su sezioni in salita, e per accumulare energia *ricaricando autoveicoli ibridi o elettrici* dei pendolari parcheggiati presso le stazioni ferroviarie.

4. Simulazione dell'esercizio di convogli merci sulla linea Torino-Modane

4.1. La questione energetica per il trasporto ferroviario delle merci

Il sostegno al trasporto intermodale delle merci è diventato negli ultimi anni una delle principali tematiche delle politiche di trasporto sia a livello comunitario sia a livello nazionale, nell'ambito di un programma più ampio di sviluppo sostenibile dal punto di vista socio-ambientale, che mira a interrompere il legame tra crescita economica e crescita del trasporto, senza restrizioni al trasporto delle merci, ma utilizzando in modo più efficiente i mezzi di trasporto stessi.

Tra i principali vantaggi derivanti dall'utilizzo del trasporto intermodale ferroviario va sicuramente ricordata una maggiore efficienza energetica, in quanto il consumo per tonnellata-chilometro è inferiore a quello dei vei-

kmph, in order to achieve values closer to 155 kmph, i.e. the max. speed allowed. A significant factor to be taken into consideration is the 2 sole stops between Turin and Modane: 1 to 2 minutes in Oulx and Cesana [9] and the longer stop in Bardonecchia.

Analysing the energy consumed by the TGV train it has been observed how also in this case consumptions calculated by the simulator are grater because, as anticipated, it neglects every phase both of coasting and of moderate braking.

The difference between the energy consumption calculated by the simulator and those measured oscillated between 3% and 10%. A similar trend can be found in the braking efforts: as the matter of facts the simulator forecasts an effort – on average – about 10% higher than those elaborated starting from the experimental data measured on the train.

As a conclusion of this first part, some qualitative observations are proposed. In facts it is possible to understand how the line speed is not fully exploited and the overall average speed is approximately half of the maximum one admitted by the infrastructure. If in the case of the regional train, whose timetable implies a high number of intermediate stops, the comparison between these two speeds has little significance, in the case of the TGV (that stops only in Turin-I, Oulx-Cesana-I, Bardonecchia-I and Modane-F) it is possible to identify a not complete exploitation of the infrastructure and of the performances of the rolling stock. The running times are another objective parameter: even admitting the accuracy limits of the employed simulator, it identifies in the total running time a potential optimisation of approx. 25 min (also considering the safety constraints imposed by SCMT and eventual timetable limitations due to the interaction with other convoys) on the total 170 minutes (calculated on both ways) for the regional train. As concerns the TGV train, the improvement percentage is about 5%, taking into consideration the maximum speed admitted on the line. On the energy point of view, considering the repeated and frequent braking of the regional trains during their run, the adoption of electrical regenerative braking systems could involve significant energy savings. In facts it could be possible to use the energy such recovered for powering other convoys which are at the same time accelerating, possibly in steep sections, and to accumulate energy for recharging electric or hybrid motor vehicles of commuters parked at rail stations.

4. Simulation of the freight train service on the Turin-Modane line

4.1. The energy issue in the railway transport of the goods

In the last few years, promoting the intermodal transport of the goods has become one of the main themes of the transport policies at both EU and national level, within the framework of a wider program of sustainable social and environmental development, with the aim of interrupting

SCIENZA E TECNICA

coli commerciali stradali, a condizione che venga sfruttata a pieno la capacità di carico dei convogli. Tuttavia, nel caso di un insufficiente utilizzo della capacità di carico o nel caso in cui le tratte iniziali e finali - generalmente a trazione stradale - del trasporto intermodale siano particolarmente lunghe, può risultare che dal punto di vista energetico esso risulti meno efficiente del trasporto stradale, considerando anche i notevoli progressi tecnologici che sono stati introdotti nel settore dei veicoli commerciali.

4.2. Problematiche nell'esercizio dei rotabili merci

Essendo le masse in gioco notevolmente superiori rispetto ai convogli passeggeri, in vista della concreta possibilità di comporre convogli lunghi (con lunghezze superiori ai 500 m, auspicabilmente di 700-750 m), che percorrano distanze mediamente maggiori a quelle attuali, risulta particolarmente rilevante adottare provvedimenti mirati alla definizione di profili di velocità ottimali che contengano i consumi energetici sia in trazione che in frenatura, dove è auspicabile una minimizzazione dell'energia dissipata anche per contenere la progressiva usura dei ceppi dei freni, con connessi costi manutentivi.

L'impianto frenante infatti risulta particolarmente sollecitato per i convogli merci che percorrono linee ad elevata pendenza (ad esempio le linee che attraversano valichi alpini) o che sono sottoposti a continui cicli di accelerazione/frenatura per soste ravvicinate o per il rispetto di limiti di velocità molto eterogenei tra tratte di linea successive.

La frenatura a ceppi è caratterizzata da ceppi che agiscono sulla superficie conica della tavola di rotolamento. La frenatura del veicolo, tramite l'azione dei ceppi sulle ruote, può essere di contenimento, su una data pendenza, o di arresto. La prima è tipica della marcia dei veicoli su discese come quelle del Gottardo, per esempio, dove si hanno pendenze medie del 15,2‰ per una lunghezza di 46 km. Con frenature di contenimento così prolungate, la temperatura sulle ruote tende a raggiungere valori anche superiori a 500°C, causando talvolta l'alterazione delle caratteristiche del materiale del ceppo e della ruota, con conseguente variazione di attrito tra i due materiali striscianti.

Diversamente, nel caso della frenatura di arresto, l'azione dei ceppi si protrae per durate minori, non generando normalmente problemi di surriscaldamento.

I ceppi e le ruote sono quindi sollecitati termicamente e meccanicamente sia in fase di arresto che in fase di contenimento del veicolo ma, sebbene i ceppi siano sollecitati solo in fase di frenatura, la ruota soggiace a sollecitazioni meccaniche anche nelle altre condizioni di marcia [16].

Va considerato che durante la frenatura di arresto e di emergenza la temperatura sulla tavola di rotolamento è molto alta (circa 250-300°C) mentre nella cartella, in corrispondenza della parte interna del cerchione, si hanno temperature di 35-45°C: in queste condizioni il gradiente

the link between the economic growth and the growth of transport, without restrictions to the transport of the goods, but through a more efficient exploitation of the means of transport.

Amongst the main advantages which derive from the use of intermodal railway transport, the higher energy efficiency is certainly worth being reminded, since the consumption by ton/kilometre is lower than the one of the commercial road vehicles, provided the trains are exploited at their full load capacity. However, in case of insufficient use of the payload capacity, or if the initial and final sections of the intermodal transport, which are generally performed by road traction, are particularly long, trains may appear - on the energy point of view - to be less efficient than road transport, because of the remarkable technological progress achieved in the commercial vehicle industry.

4.2. Issues in the service of the freight trains

Since the masses involved are remarkably greater than the ones of the passenger trains, and in the perspective of the concrete opportunity of setting up long trains (of lengths greater than 500 m, hopefully 700-750 m), covering longer average distances than the current ones, special attention should be paid to measures aimed at the definition of optimum speed profiles, which can contain energy consumption both in traction and in braking, where it would be appropriate to minimise the dissipated energy in order to contain the progressive wear of the brake shoes, and their related maintenance costs.

The braking system is particularly stressed in the freight trains which cover high grade lines (e.g. the lines across Alpine passes) or - in any case - lines submitted to continuous cycles of acceleration/braking for close stops or or complying with widely heterogeneous speed limits between subsequent line stretches.

Shoe braking is characterised by the action of the shoes on the tapered surface of the turning surface. Braking can be applied, by the action of the shoes on the wheels, either to contain the speed at a given grade, or to take the vehicle to a complete stop. The former case is typical on the vehicles running downhill, like for example in the Gotthard line, which features average grades of 15.2‰ for a length of 46 km. During such prolonged containment braking, the temperature on the wheels tends to reach values even greater than 500°C, which sometimes alters the features of both the shoe and the wheel material, with a subsequent variation in the friction between them.

Differently, in case of braking to stop, the shoes actions last shorter times, normally not generating overheating problems.

The shoes and the wheels are therefore submitted to thermal and mechanical stress both when stopping or containing the vehicle, but - whilst the shoes are submitted to stress at the braking stage only - the wheel is under stress in the other running conditions as well [16].

SCIENZA E TECNICA

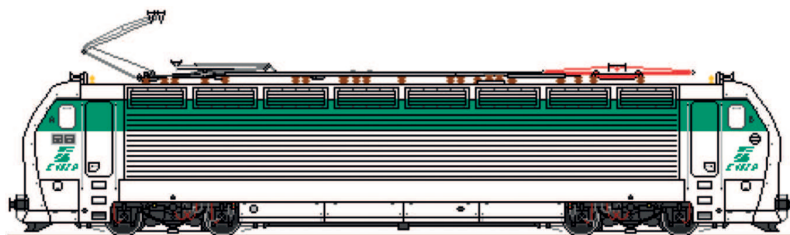
dovuto alla variazione di temperatura risulta elevato nello spessore del cerchione, causando l'insorgere di tensioni termiche.

Per ciò che concerne la frenatura di contenimento, il problema è determinato dalle elevate temperature a cui giunge il cerchione (si possono raggiungere temperature di 500-600° C): in questo caso la temperatura è elevata ma a causa dell'elevata durata nel tempo della manovra il gradiente termico tra tavola di rotolamento e cartella risulta minore che nel caso della frenatura d'arresto. Tuttavia le temperature elevate alterano le caratteristiche di attrito tipiche dell'accoppiamento ceppo – ruota degradandone le prestazioni. La modalità di condotta dei convogli merci in tali situazioni può essere per questi motivi piuttosto critica (per quanto riguarda sia la condotta del treno sia le sollecitazioni all'impianto frenante) ed è di fatti oggetto di istruzione del corso da macchinista.

4.3. Simulazione di un convoglio merci sulla tratta Torino-Bussoleno

La seconda parte del lavoro riguarda la simulazione della marcia di un convoglio merci mediante integrazione tabellare dell'equazione del moto, considerando il tratto iniziale della linea Torino-Modane, tra le stazioni di Torino Porta Nuova e Bussoleno, distanti 45,534 km. Il convoglio considerato si compone di 20 carri di tipo Sgns, con un carico di due TEU (container da 20 ft), trainati da due locomotori E.402B, posti in testa.

Dati di targa principali e immagine del locomotore E.402B
Main nameplate data and image of the locomotive E.402B



Locomotore E.402B - Locomotive E.402B	2	Num.
Rodiggio - Wheels arrangement	Bo'Bo'	
Lunghezza - Length	19,42	m
Velocità max - Max speed	200	km/h
Massa - Mass	89	t
Peso locomotore - Weight of the locomotive	873	kN
Potenza max all'avviamento - Max power at start-up	6000	KW
Potenza continuativa alle ruote - continuous power to the wheel	5600	KW
Sforzo di trazione all'avviamento - Traction effort at start-up	280	KN
Massa frenata locomotore - Braked mass of the locomotive	79	t

It must be considered that - during stopping and emergency braking - the temperature on the rim surface is very high (approximately 250 to 300°C), whilst in correspondence of the inner portion of the wheel rim the temperature is approximately 35 to 45°C. In these conditions, the gradient due to the temperature variation is high in the thickness of the wheel rim, generating high thermal stress.

As far as containment braking is concerned, the issue is the high temperature reached by the wheel rim (up to 500 to 600° C): in this case, the temperature is high but since the braking manoeuvre is rather prolonged in time the thermal gradient between rim and interior surfaces is minor than in stopping braking case. Nevertheless, the high temperatures alter the friction features of the shoe-wheel pair, thus degrading its performances. For these reasons the driving modality of freight convoys in such conditions could be rather critical (as concerns both the train driving and the stress of the braking system), and it is therefore matter of instruction during the divers courses.

4.3. Simulation of a freight train on the Turin-Bussoleno line

The second part of the activity concerns the simulation of the operation of a freight train, making use of the tabular integration of the motion equation, considering the initial section of the Turin-Modane line, between the stations of Turin Porta Nuova and Bussoleno, for an overall distance of 45.534 km. The train taken into consideration consists of 20 wagons of the Sgns type, with a load of two TEUs (20 ft. containers), towed by two locomotives of the E.402B type, located at the head.

The features of the locomotive and of the wagons are reported respectively in tables 5 and 6, whilst table 7 reports other data relevant to the features of both the train and the infrastructure.

The train in exam has a length of approximately 432 m, with a total mass of 1338 t, circulating in rank (route group) A, with max speed (allowed by the rolling stock) of 100 kmph. This maximum speed is actually determined by the maximum one admitted by the considered wagons.

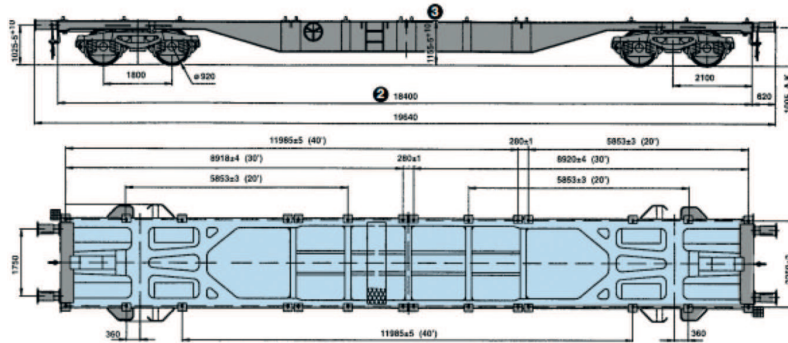
The method utilised for the simulation of the train run has been the integration of the traction equation, which allows tracing the motion diagram and the calculation of an isolated train.

The main purpose of such simulation was to numerically evaluate the

SCIENZA E TECNICA

TABELLA 6 – TABLE 6

Vista laterale, vista in pianta e dati di targa di un carro ferroviario Sgns
Side view, plan view and nameplate data of a Sgns wagon



Marcatura letterale - Letter marking	Sgns
Massa minima tassabile - Minimum taxable mass	15 t
Capacità di carico massima - Max load capacity	70 t
Lunghezza di carico (2) - Load length (2)	18400 mm
Tara media - Average tare weight	20 t
Altezza superficie di carico dal piano del ferro - Height of the load surface from rail level	1155 mm
Distanza fra i perni dei carrelli - Distance between the trolley studs	14200 mm
Passo esterno - Outside pitch	16000 mm
Lunghezza fuori tutto - Overall length	19640 mm

Carri Sgns del convoglio in esame - Sgns Wagons of the train in exam		
Numero carri - Number of wagons	20	
Velocità max - Max speed	100	km/h
Lunghezza carro - Length of the wagon	19,64	m
Massa di un carro (vuoto) - Mass of a wagon (empty)	18	t
Carico trasportato da un carro - Load transported by a wagon	40	t
Massa di un carro (carico) - Mass of a wagon (loaded)	58	t
Massa frenata carro - Braked mass of the wagon	56	t

Le caratteristiche del locomotore e dei carri sono indicate rispettivamente nelle tabelle 5 e 6.

Nella tabella 7 invece si riportano altri dati inerenti alle caratteristiche del convoglio e dell'infrastruttura.

Il convoglio così costituito ha una lunghezza pari a circa 432 m, con una massa totale di 1338 t, circolante in rango A, con velocità massima (ammessa dal materiale rotabile) pari a 100 km/h. Tale velocità è di fatto condizionata da quella ammessa dai carri in questione.

Il metodo utilizzato per la simulazione della marcia del convoglio è stato quello dell'integrazione dell'equazione della trazione, che consente il tracciamento dei diagrammi del moto ed il calcolo delle prestazioni di un convoglio isolato.

energy dissipated by the train at braking [15], as a function of the braking strength applied. The motion of the convoy was determined by optimising the acceleration, cruising and braking stages, assessing the space required to stop in correspondence to the final station of Bussoleno, and assuming the absence of intermediate stops.

The dissipated energy L_{freni} (for shoe-wheel friction) values obtained during braking are reported in the table of Table 8, on equal characteristics of the line, of the train and of the indications supplied by the line side, as related to a given braking strength applied as well as to a more or less significant time advance of the same strength. Five braking modalities have been taken into account; each of them corresponds to a precise percentage value of the max. breaking strength available. This latter is equal to 3134 kN (see table 6) and it is calculated in adhesion conditions: it represents therefore the maximum theoretical braking effort that the train is able to deploy and it can be used as a landmark.

It can be noticed that the energy L_{freni} dissipated in braking versus the braking strength applied varies according to a square function of type $y = -ax^2 + ax + bx + c$: the value of the diminished energy reduces with the diminution of the strength (fig. 8).

Versus the baseline condition, where the running of the train is optimised on the minimum running time standpoint and using the max. available braking, progressively lower values of dissipated energy L_{freni} are obtained, with an energy saving of 2.29% (table 8) - if only 20% of the strength available were applied. This situation would imply an advance of the braking action by the driver of approx. 50", a total space covered in braking stage approx. 850 m (table 9) and a lengthening of the running time of 26" only (table 10). In particular, table 8 highlights how, with the reduction of the applied braking strength, in the same space covered in acceleration, lower cruising space can be covered, since the lower intensity of the braking action calls for longer braking space: nevertheless, the energy dissipated for wheels-shoes friction at such stage diminishes with the reduction of the braking stage itself.

On the other hand, the energy dissipated for wheels-shoes friction and the duration of the braking action are linked by

SCIENZA E TECNICA

Lo scopo principale di tale simulazione è stato quello di valutare numericamente l'energia dissipata dal convoglio durante la fase di frenatura [15], in funzione della forza frenante applicata. Il moto del convoglio è stato determinato ottimizzando le fasi di accelerazione, regime e frenatura, valutando lo spazio necessario per l'arresto in corrispondenza della stazione finale di Bussoleno, e supponendo l'assenza di soste intermedie.

A parità di caratteristiche della linea, del convoglio e delle indicazioni fornite dalla fiancata, sono stati ottenuti i valori di energia dissipata per attrito ceppo-ruota L_{freni} durante la frenatura indicati nella tabella 8, in relazione ad una determinata forza frenante applicata, nonché ad un anticipo temporale più o meno importante della stessa applicazione. Sono state considerate cinque modalità di frenatura, ognuna corrispondente ad un preciso valore percentuale della forza di frenatura massima applicabile. Quest'ultima è pari a 3134 kN (si veda tabella 6) ed è calcolata ai limiti dell'aderenza: rappresenta quindi la massima forza frenante teorica che il treno è in grado di sviluppare e può dunque venire adoperata come riferimento.

E' possibile notare come l'energia L_{freni} dissipata in frenata rispetto alla forza di frenatura applicata vari secondo una legge quadratica del tipo $y = -ax^2 + bx + c$: al diminuire della forza, diminuisce il valore di energia dissipata (fig. 8).

Rispetto alla situazione "base", in cui si ottimizza la marcia del treno dal punto di vista del tempo di percorrenza minimo ed utilizzando la massima forza di frenatura disponibile, si ottengono valori di energia dissipata L_{freni} via via minori, con un risparmio energetico del 2,29% (tabella 7) nel caso si applicasse solo il 20% della forza disponibile. Tale situazione comporterebbe un anticipo dell'azione frenante da parte del macchinista di circa 50 secondi, uno spazio totale percorso in fase di frenatura pari a circa 850 m (tabella 9) ed un allungamento del tempo di percorrenza della tratta di soli 26 secondi (tabella 10). In particolare, la tabella 8 evidenzia come al diminuire della forza frenante applicata, a parità di spazio percorso in accelerazione, sia possibile percorrere uno spazio a regime minore, in quanto la minor intensità dell'azione frenante richiede uno spazio di frenatura maggiore: tuttavia l'energia dissipata per attrito ceppo-ruota L_{freni} in tale fase diminuisce al diminuire della forza frenante stessa.

TABELLA 7 – TABLE 7

Altre caratteristiche del convoglio
Other features of the train

Lunghezza del convoglio Length of the train	431,64	m
Massa del convoglio Mass of the train	1338	t
Peso del convoglio Weight of the train	13126	kN
Forza di trazione ai limiti aderenza traction strength at the adhesion limits	437	kN
Percentuale di peso frenato convoglio Percentage of braked weight	95,5	%
Forza di frenatura Braking strength	3134	kN
Coefficiente di aderenza Adhesion coefficient	0,25	
Coefficiente di resistenza al rotolamento Rolling resistance coefficient	2	N/kN
Coefficiente per le masse rotanti Coefficient for the rotating masses	1,08	

TABELLA 8 – TABLE 8

Valori di energia dissipata e relativo risparmio energetico (rispetto alla condizione base) per diversi valori della forza di frenatura applicata
Values of dissipated energy and relevant energy saving (versus the basic condition) for different values of the braking strength applied

% Forza fren. max % Braking strength max	Forza frenatura applicata Braking strength applied	Energia dissipata in frenata L_{freni} Energy dissipated at braking L_{freni}	Risparmio energetico Energy saving
100%	3134 kN	510000 KJ	
80%	2507 kN	508000 KJ	-0,25%
60%	1880 kN	506000 KJ	-0,41%
40%	1253 kN	502000 KJ	-0,80%
20%	626 kN	491000 KJ	-2,29%

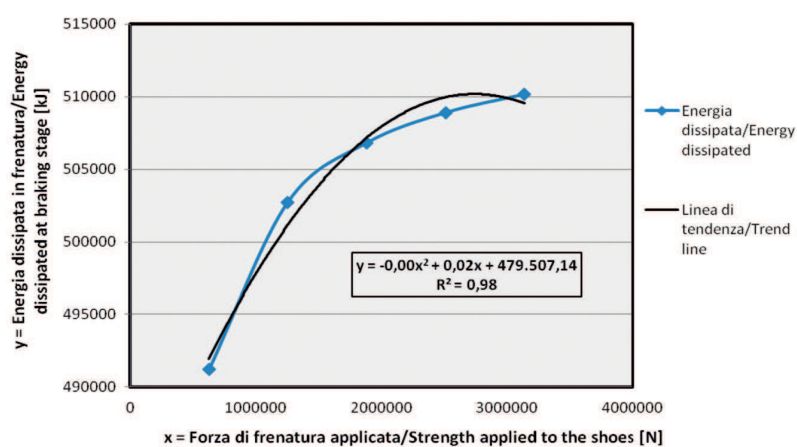


Fig. 8 - Energia dissipata in fase di frenatura L_{freni} in funzione della forza applicata ai ceppi.
Fig. 8 - Energy dissipated L_{freni} at braking stage as a function of the strength applied to the shoes.

SCIENZA E TECNICA

Diversamente l'energia dissipata per attrito ceppo-ruota L_{freni} e la durata dell'azione frenante sono legati da una legge di tipo lineare, con una durata minima di circa 12 secondi nel caso di massima applicazione della forza ed una durata massima di 62 secondi nel caso di minimo valore di sforzo frenante e minima energia dissipata (fig. 9).

Tuttavia, se ci si focalizza sul consumo energetico del "sistema treno" e non solo sull'impianto frenante, risulta necessario ricordare che l'energia dissipata ai ceppi in fase di arresto o rallentamento è solo una limitata quota dell'energia che viene spesa durante l'esercizio. E' noto infatti che in tale bilancio è necessario tenere conto delle tre tipologie di resistenze che si oppongono al movimento dei rotabili: resistenze ordinarie (attrito ruota/rotaia, attrito ai cuscinetti, resistenza aerodinamica, resistenza dovuta alla perdita di energia negli organi di sospensione), resistenze accidentali (resistenza in curva e livellette) e resistenze d'inerzia (resistenze che si manifestano all'avviamento o durante la fase di accelerazione). In particolare, per velocità superiori a 80-90 km/h, la resistenza aerodinamica diventa sovente preponderante sulle altre.

Da un punto di vista matematico è possibile quindi scrivere la seguente uguaglianza:

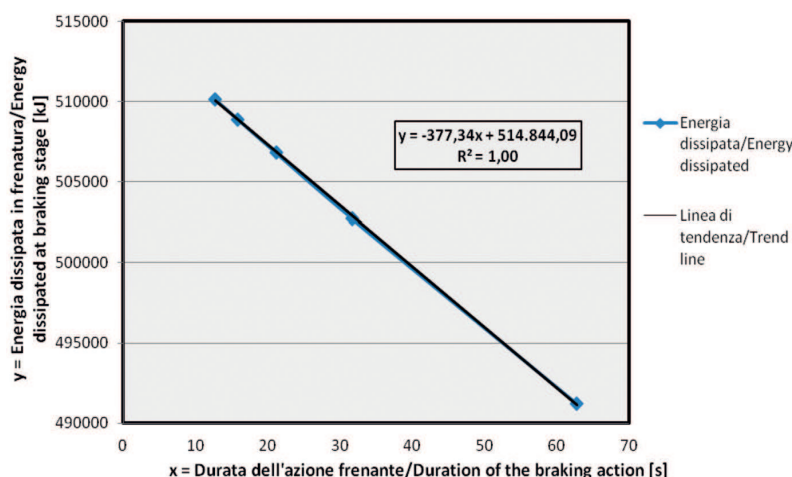


Fig. 9 - Energia dissipata in fase di frenatura L_{freni} in funzione della durata dell'azione frenante.

Fig. 9 - Energy dissipated L_{freni} at braking stage as a function of the duration of the braking action.

TABELLA 9 – TABLE 9

Valore degli spazi percorsi nelle tre fasi del moto in funzione della forza frenante applicata

Value of the spaces covered in the three motions stages as a function of the braking stage applied

% Forza fren. max % Braking strength max	Spazio accel. Acceleration space	s regime s cruising	Spazio frenat. braking space	Anticipo sp. fren. Braking space advance
100%	2384 m	42973 m	175,5 m	
80%	2384 m	42930 m	218,9 m	43,3 m
60%	2384 m	42858 m	290,8 m	115,3 m
40%	2384 m	42716 m	433,1 m	257,5 m
20%	2384 m	42301 m	848,1 m	672,6 m

TABELLA 10 – TABLE 10

Durata delle tre fasi del moto in funzione della forza frenante applicata

Duration of the three stages of the motion as a function of the braking stage applied

% Forza fren. max % Braking strength max	Tempo accelerazione Acceleration time	Tempo regime Cruising time	Tempo frenatura Braking time	Tempo totale Total time	Anticipo t frenatura Braking advance t
100%	147 s	1629 s	12,7 s	1789 s	
80%	147 s	1627 s	15,9 s	1790 s	3,1 s
60%	147 s	1625 s	21,1 s	1793 s	8,4 s
40%	147 s	1620 s	31,6 s	1798 s	18,9 s
20%	147 s	1605 s	62,7 s	1815 s	50 s

a linear relationship, with a minimum duration of approximately 12" in case of maximum application of the strength and maximum duration of 62" in case of minimum value of braking effort and minimum dissipated energy (fig. 8).

Nevertheless, if the focus is on the energy consumption of the "train system" and not only on braking, it is worth reminding that the energy dissipated to the brake shoes during the stop or slowing-down stages is just a limited portion of the energy spent during the operation. It is known that such balance must take into account the three types of resistances which oppose the motion of the rolling stock, namely: ordinary resistances (wheel/ rail friction, friction in the bearings, aerodynamic resistance, resistance due to the loss of energy in the suspension organs), accidental resistances (resistance due to curves and slopes) and inertial resistance (resistances which appear at start-up or during the acceleration stage). In particular, for speeds greater than 80-90 kmph, the aerodynamic resistance frequently prevails on the other ones.

SCIENZA E TECNICA

$$E_{\text{potenziale}} + E_{\text{cinetica, iniz.}} = E_{\text{cinetica, fin.}} + L_{\text{aerodin.}} + L_{\text{attrito}} + L_{\text{freni}} + L_{\text{resist. accidentali}} + L_{\text{inerzia}}$$

in cui

- $E_{\text{potenziale}}$ rappresenta l'energia potenziale che il treno possiede per la sua specifica posizione rispetto ad un punto successivo del tracciato situato a quota inferiore;
- $E_{\text{cinetica, iniz.}}$ è la quantità di energia cinetica, pari ad $\frac{1}{2} M_{\text{TOT}} v_i^2$, posseduta dal treno all'inizio della fase di frenatura (ovvero al termine della fase di accelerazione);
- $E_{\text{cinetica, fin.}}$ è la quantità di energia cinetica, pari ad $\frac{1}{2} M_{\text{TOT}} v_f^2$, posseduta dal treno alla fine della fase di frenatura;
- $L_{\text{aerodin.}}$ è il lavoro svolto dalle forze aerodinamiche durante la fase di frenatura, dove la resistenza aerodinamica è pari a $L_{\text{aerodinamica}} = \frac{1}{2} \rho C S v^2$, in cui ρ è la densità dell'aria, C è il coefficiente di forma dovuto al profilo geometrico del convoglio, S è l'area della superficie trasversale dello stesso;
- L_{attrito} è il lavoro dovuto alle forze di attrito (contatto ruota/rotaia, forze nei cuscinetti e negli organi di sospensione);
- L_{freni} è il lavoro attribuito al sistema frenante, dovuto all'applicazione della forza di frenatura (energia dissipata per attrito ceppo-ruota);
- $L_{\text{resist. accidentali}}$ è il lavoro dovuto alla forza di gravità ed alla resistenza in curva;
- L_{inerzia} è il lavoro compiuto dalle forze di inerzia che si manifestano durante la fase di accelerazione: è fornito dal prodotto dello spostamento per il termine inerziale ($\beta \cdot M_{\text{TOT}} \frac{dv}{dt}$) dell'equazione del moto, dove β è il coefficiente di omogeneizzazione delle masse rotanti, il quale introduce gli effetti di quest'ultime sull'inerzia complessiva del treno.

Si noti come al secondo membro, eccezion fatta per $E_{\text{cinetica, fin.}}$ (che alla fine della fase di frenatura assume di fatto un valore nullo, in quanto $v_f = 0$), tutti i contributi siano negativi, in quanto le resistenze citate sono di carattere dissipativo (lavoro negativo).

Soffermando l'attenzione su quest'ultima fase del moto per le diverse simulazioni effettuate, trascurando per i motivi suddetti l'energia potenziale posseduta dal treno alla fine della fase di accelerazione, e ponendo $L_{\text{inerzia}} = 0$ (in quanto il treno è in decelerazione), è possibile riscrivere la precedente relazione come:

$$\Delta E_{\text{cinetica}} = E_{\text{cinetica, iniz.}} - E_{\text{cinetica, fin.}} = L_{\text{aerodin.}} + L_{\text{attrito}} + L_{\text{freni}} + L_{\text{resist. accidentali}}$$

ovvero la variazione di energia cinetica per tutti gli scenari analizzati - a parità di resistenze accidentali - è la medesima (tutti i convogli raggiungono infatti a regime la velocità di 100 km/h) ed è trasformata, durante la fase di ar-

On a mathematic point of view the following equation can be written

$$E_{\text{potenziale}} + E_{\text{cinetica, iniz.}} = E_{\text{cinetica, fin.}} + L_{\text{aerodin.}} + L_{\text{attrito}} + L_{\text{freni}} + L_{\text{resist. accidentali}} + L_{\text{inerzia}}$$

where:

- $E_{\text{potenziale}}$ represents the potential energy due to the specific position of the train for its specific position vs. a following point of the track located at lower altitude;
- $E_{\text{cinetica, iniz.}}$ is the quantity of kinetic energy, equal to $\frac{1}{2} M_{\text{TOT}} v_i^2$, of the train at the beginning of the braking stage (i.e. at the end of the acceleration stage);
- $E_{\text{cinetica, fin.}}$ is the quantity of kinetic energy, equal to $\frac{1}{2} M_{\text{TOT}} v_f^2$, of the train at the end of the braking stage;
- $L_{\text{aerodin.}}$ is the work of the aerodynamic strengths during the braking stage, where the aerodynamic resistance is equal to $L_{\text{aerodinamica}} = \frac{1}{2} \rho C S v^2$, where ρ is the density of the air, C is the form factor due to the geometric profile of the train, S is the area of its guide surface;
- L_{attrito} is the negative work due to the friction strengths (wheel/rail contact, strengths in the bearings and in the suspension organs);
- L_{freni} is the mechanical work allocated to the braking system, due to the application of the braking strength (energy dissipated for shoe-wheel friction);
- $L_{\text{resist. accidentali}}$ is the work due to gravity and to the curve resistance;
- L_{inerzia} is the work exerted by the inertial strengths which manifest during the acceleration stages: it is given by the product of the displacement for the inertial term ($\beta \cdot M_{\text{TOT}} \frac{dv}{dt}$) of the motion equation. β is the rotating masses coefficient, introduced for modeling their influence on the overall inertia of the train.

It is worth noticing that at the second member, with the exception of $E_{\text{cinetica, fin.}}$ (which, at the end of the braking stage, actually takes a null value as $v_f = 0$), all the contributions are negative, since the resistances mentioned are of dissipative character (negative work).

Focusing on this last stage of the motion, due to the different simulations performed, overlooking - for the aforementioned reasons - the potential energy of the train at the end of the acceleration stage, and setting $L_{\text{inerzia}} = 0$ (since the train is in deceleration), the previous ratio can be written as:

$$\Delta E_{\text{cinetica}} = E_{\text{cinetica, iniz.}} - E_{\text{cinetica, fin.}} = L_{\text{aerodin.}} + L_{\text{attrito}} + L_{\text{freni}} + L_{\text{resist. accidentali}}$$

in other terms, the variation of kinetic energy for all the analysed scenarios - at the same accidental resistances - is the same (all the trains reach the cruising speed of 100 kmph) and is transformed - during the stop stage - in nega-

SCIENZA E TECNICA

resto, in lavoro (negativo) compiuto dalle forze aerodinamiche, dalle forze di attrito e dall'azione meccanica esercitata dal freno, che tendono a rallentare via via il treno.

Tuttavia, supponendo di trascurare il contributo dovuto al contatto ruota/rotaia, alle forze scambiate nei cuscinetti e negli organi di sospensione – che insieme all'azione dei freni si manifestano sotto forma di calore dissipato a basse temperature – è possibile affermare che la conversione di tale energia cinetica sia affidata al lavoro di tali forze dissipative secondo apporti differenti: tanto maggiore sarà l'azione frenante applicata (tanto più breve quindi sarà la durata della fase di frenatura) tanto più importante sarà il contributo L_{freni} mentre più basso sarà $L_{aerodin.}$ (il lavoro negativo viene attribuito principalmente all'azione meccanica); viceversa, ad un'azione frenante più contenuta, effettuata con un certo anticipo da parte del macchinista, corrisponde un più alto contributo del lavoro resistente delle forze aerodinamiche che, di per sé, tenderanno “naturalmente” a rallentare il treno, con una conseguente riduzione dell'energia cinetica dissipata facendo ricorso all'azione dei freni. Ciò emerge dalle simulazioni numeriche effettuate, in cui un'azione frenante più ridotta in valore, anche se applicata per un tempo maggiore, conduce ad una minor usura del freno per rallentare il medesimo convoglio, in quanto, rispetto agli altri casi, si attribuisce tale quota di energia necessaria all'arresto all'azione della resistenza aerodinamica.

4.4. Modellazione analitica dei consumi energetici in fase di frenatura per un convoglio merci

A partire dai primi risultati ottenuti nelle simulazioni precedenti, si è cercato di trovare una relazione matematica che permettesse di valutare i consumi energetici interessanti la fase di frenatura nel caso più generale possibile.

Considerando lo stesso convoglio della simulazione precedente e la stessa distanza di percorrenza (45,534 km), ma ipotizzando pendenze trascurabili della linea, ci si è proposti di valutare l'energia dissipata in frenatura non solo in funzione della forza frenante applicata, ma anche in funzione della massima velocità raggiunta durante la marcia.

Per ogni velocità massima stabilita (intervalli di 20 km/h, da 100 km/h a 20 km/h), si è ipotizzato quindi di simulare la marcia del treno merci, definendo una fase di accelerazione iniziale per il suo raggiungimento, una fase di regime ove il convoglio mantiene tale velocità ed una fase di frenatura, con diversi valori di forza frenante applicata e con tempi di percorrenza conseguentemente differenti in funzione dello scenario considerato.

La condizione ottimale dal punto di vista della durata del viaggio - ma peggiore dal punto di vista energetico - è sicuramente quella che prevede una velocità massima di 100 km/h e forza di frenatura applicata massima ai limiti dell'aderenza. Al contrario, una marcia a velocità massima pari a 20 km/h con forza di frenatura applicata pari al 20% dello sforzo massimo frenante teorico, sebbene comporti un risparmio energetico notevole, implica tempi di percorrenza

positive work performed by the aerodynamic strengths and by the mechanical action exerted by the brake, which tend to progressively slow down the train.

Nevertheless, if we assume to overlook the contribution due to the wheel/rail contact, to the strengths exchanged in the bearings and in the suspension organs - which, together with the action of the brakes, manifest as heat dissipated at low temperatures - it can be stated that the conversion of such kinetic energy is entrusted to the work of the dissipative strength in different contributions: the greater the braking action applied is (and - therefore - the shorter the braking stage) the more significant the contribution of L_{freni} will be, whilst $L_{aerodin.}$ will be lower (the negative work is mainly ascribed to the mechanical action); on the other hand, a more contained braking action, performed by the driver with some advance, corresponds to a higher contribution of the aerodynamic strengths that - per se - will “naturally” tend to slow down the train, with a subsequent reduction of the dissipated kinetic energy thanks to the action of the brakes. These results from the numerical simulations performed, where a braking action of lower value applied to slow down the same train - even though applied for longer time - leads to lower wear of the brake, since - versus the other cases - the energy share required for the stop is ascribed to the action of the aerodynamic friction.

4.4. Analytical modelling of energy consumption at the braking stage for a freight train

Starting from the results achieved in the previous simulations, a mathematical ratio has been sought for assessing the energy consumption involved in the braking stage in the most general case.

Considering the same train of the previous simulation and the same coverage distance (i.e. 45.534 km), but assuming negligible grades of the line, we have aimed at assessing the energy dissipated at braking not only as a function of the braking effort applied, but also of the maximum speed reached during running.

For each maximum speed established (intervals of 20 kmph, from 100 kmph to 20 kmph), we have therefore assumed to simulate the running of the freight train, defining an initial acceleration stage to reach it, a cruising speed stage where the train keeps such speed and a braking stage, with different values of braking strength applied, with different running times as a function of the considered scenario.

The optimum condition as related to the duration of the trip - which is though worse on the energy point of view - is certainly the one which involves a maximum speed attained of 100 kmph and a maximum braking strength at the limits of adherence. On the other hand a run at the maximum speed equal to 20 kmph with applied braking strength equal to 20% of the maximum theoretical braking effort - even though it would apply remarkable energy savings - involves a too high running times which

SCIENZA E TECNICA

elevati e potenzialmente penalizzanti dal punto di vista della potenzialità della linea (tabella 11). In tabella 11, nella quarta colonna, per ogni velocità, sono riportati i valori di energia dissipata in frenata massimi (in rosso) e minimi (in grigio). Nella quinta colonna, per ogni velocità, vengono indicati i risparmi energetici % rispetto al caso di massima applicazione della forza frenante (100%); nella settima colonna sono stati determinati tali risparmi rispetto alla condizione che minimizza il tempo di viaggio ($v_{max}=100$ km/h, %Forza frenante ai limiti dell'aderenza=100%).

Nella tabella 12 sono riportati anche gli spazi percorsi durante le tre fasi del moto del convoglio, per ogni scenario simulato. In tabella 12 nella seconda colonna è riportata la percentuale di forza frenante massima (ai limiti dell'aderenza) considerata per ogni simulazione. La terza, quarta e quinta colonna riportano rispettivamente lo spazio percorso in fase di accelerazione, regime e frenatura.

Per ogni valore di velocità massima, una frenatura teorica ai limiti dell'aderenza (100% della forza frenante disponibile) potrebbe essere associata ad uno stile di condotta di un macchinista poco esperto o poco pratico della

penalises the line capacity (table 11). In table 11, the fourth column reports - for each speed - the maximum (red) and minimum (grey) values of dissipated energy. The fifth column reports - for each speed - the percent of energy saving, in case of higher application of the braking strength (100%). The seventh column reports - on the other hand - the saving versus the condition which minimises the travel time (i.e. $v_{max}=100$ kmph, 100% of braking strength at the adherence limits). The table 12 also reports the space covered during the three stages of the train motion for each simulated scenario. In table 12, the second column reports the percentage of maximum braking strength (at adherence limits) considered for each simulation. The third, fourth and fifth columns report the space covered during the stages of acceleration, cruising and braking, respectively.

For each value of maximum speed, a theoretical braking to the limits of adherence (100% of the braking speed available) could be associated to the style of an inexperienced driver, or - at least - with little experience on the line who does not anticipate the braking action or the traction cut and then

TABELLA 11 – TABLE 11

Valori dell'energia dissipata in frenatura L_{freni} in funzione della forza applicata ai ceppi per differenti velocità massime d'esercizio

Value of the energy dissipated at braking L_{freni} as a function of the strength applied to the shoes for different maximum service speeds

v max Maximum speed	% Fr. % max brak. force	Forza Fr.[N] braking [N]	E FRE. [KJ] Energy dissipated during braking stage [kJ]	E FRE.	Risp max Maximum saving	Risp. Ass. Absolute saving	t percort. Travel time [min]
100 km/h	100%	3134000	503900				30,1
	80%	2507000	500400	-0,68%		-0,7%	30,1
	60%	1880000	494800	-1,80%		-1,8%	30,2
	40%	1253000	483900	-3,96%		-4,0%	30,2
	20%	626000	454000	-9,89%	-9,89%	-9,9%	30,5
80 km/h	100%	3134000	351100			-30,3%	36,2
	80%	2507000	316500	-9,84%		-37,2%	36,2
	60%	1880000	313700	-10,66%		-37,7%	36,3
	40%	1253000	308100	-12,25%		-38,9%	36,4
	20%	626000	292400	-16,71%	-16,71%	-42,0%	35,8
60 km/h	100%	3134000	174100			-65,4%	47,0
	80%	2507000	161100	-7,46%	-7,46%	-68,0%	47,1
	60%	1880000	172100	-1,18%		-65,8%	47,1
	40%	1253000	169600	-2,62%		-66,3%	47,1
	20%	626000	162400	-6,73%		-67,8%	47,3
40 km/h	100%	3134000	82200			-83,7%	69,1
	80%	2507000	76800	-6,58%	-6,58%	-84,8%	69,1
	60%	1880000	79800	-2,85%		-84,1%	69,4
	40%	1253000	78900	-3,95%		-84,3%	69,2
	20%	626000	78000	-5,13%		-84,5%	69,3
20 km/h	100%	3134000	20300			-96,0%	136,1
	80%	2507000	20300	-0,29%		-96,0%	136,1
	60%	1880000	20200	-0,77%		-96,0%	136,1
	40%	1253000	20000	-1,72%		-96,0%	136,1
	20%	626000	19800	-2,49%	-2,49%	-96,1%	136,1

SCIENZA E TECNICA

linea, il quale non anticipa l'azione frenante o il taglio della trazione, utilizzando quindi tutta la forza frenante ai limiti dell'aderenza; al contrario, una manovra a valori più bassi della forza frenante applicata potrebbe descrivere lo stile di condotta di un macchinista più esperto che, *conoscendo le caratteristiche della linea*, effettua una frenatura anticipata, minimizzando l'energia dissipata.

Appare altresì chiaro come l'energia dissipata in frenatura aumenti all'aumentare della velocità. In particolare le simulazioni effettuate hanno permesso di affermare che il minimo consumo energetico in frenatura y [kJ] varia a seconda della velocità massima x [km/h], secondo una legge polinomiale di 2° grado (fig. 10) del tipo

$$L_{freni} = a \cdot x^2 + b \cdot x + c$$

dove nello specifico caso in esame i coefficienti valgono

$$a = 45,7; b = 71,1; c = 3809,0$$

A seconda della velocità, si sono riscontrati i consumi minimi (tabella 10):

- applicando il 20% della forza di frenatura massima per velocità comprese tra gli 80 e i 100 km/h;
- applicando il 50% della forza di frenatura per velocità comprese tra i 60 e gli 80 km/h;
- applicando l'80% della forza di frenatura massima per velocità comprese tra i 40 e i 60 km/h;

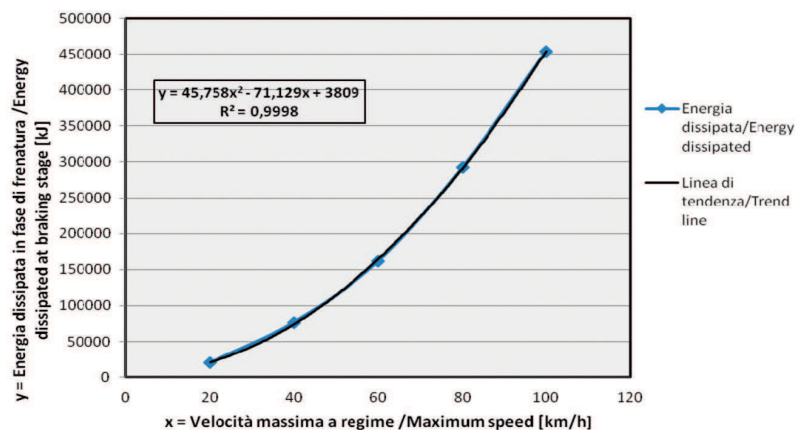


Fig. 10 - Curva dei consumi energetici minimi relativi alla fase di frenatura (energia dissipata ai ceppi del sistema frenante L_{freni}).

Fig. 10 - Curve of the energy consumption relevant to the braking stage (energy dissipated to the braking system shoes L_{freni}).

TABELLA 12 – TABLE 12

Spazi relativi alle fasi di marcia del convoglio in funzione della forza frenante applicata.

Spaces relevant to the running stages of the train as a function of the braking strength applied

v max Maximum speed	% FR % max brak. force	S acc. [m] Acceleration space [m]	S reg. [m] Cruising space [m]	S fren. [m] Braking space [m]
100 km/h	100%	1601,3	43759,1	173,6
	80%	1601,3	43717,0	215,7
	60%	1601,3	43648,1	284,6
	40%	1601,3	43514,5	418,2
	20%	1601,3	43143,7	789,0
80 km/h	100%	963,9	44458,1	112,0
	80%	966,9	44427,4	139,7
	60%	962,2	44387,9	184,0
	40%	962,2	44300,4	271,5
	20%	966,9	43046,7	520,5
60 km/h	100%	521,2	44949,5	63,3
	80%	521,2	44934,1	78,8
	60%	521,3	44908,5	104,4
	40%	521,2	44858,2	154,6
	20%	521,3	44715,0	297,9
40 km/h	100%	226,3	45279,4	28,3
	80%	226,3	45272,4	35,3
	60%	224,3	45263,4	46,4
	40%	226,3	45238,3	69,4
	20%	226,3	45173,0	134,8
20 km/h	100%	56,2	45470,9	7,2
	80%	56,2	45469,1	8,9
	60%	56,2	45466,0	11,8
	40%	56,2	45460,4	17,6
	20%	56,2	45443,7	34,3

utilises the whole braking strength to the limits of the adherence; on the other hand, a manoeuvre with lower values of the braking strength applied could describe the style of a more experienced driver who - knowing the characteristics of the line - brakes in advance, thus minimising the dissipated energy.

Moreover it clearly appears that the energy dissipated at braking increases as the speed itself increases.

In particular, the simulations performed allowed stating that the minimum energy consumption at braking y [kJ] varies according to the maximum speed x [kmph], according to a second order polynomial law (fig. 10) of type

$$L_{freni} = a \cdot x^2 + b \cdot x + c$$

where - in the specific case - the coefficients are worth

$$a = 45,758; b = 71,129; c = 3809,0$$

SCIENZA E TECNICA

TABELLA 13 – TABLE 13

Durata delle fasi di marcia del convoglio in funzione della forza frenante applicata
Duration of the running stages of the train as a function of the braking strength applied

v max Maximum speed	%FR % max brak. force	t acc [s] t acc [s]	t reg. [s] t cruising [s]	t fren. [s] t brak. [s]	t tot. [s] t tot. [s]	t tot. [min] t tot. [min]	t anticipo fr. [s] t forward br. [s]
100 km/h	100%	110	1684	13	1806	30,1	
	80%	110	1682	16	1807	30,1	3,1
	60%	110	1680	21	1810	30,2	8,1
	40%	110	1675	30	1815	30,2	17,9
	20%	110	1661	58	1829	30,5	45,6
80 km/h	100%	84	2081	10	2175	36,2	
	80%	84	2077	13	2173	36,2	2,5
	60%	84	2079	17	2180	36,3	6,5
	40%	84	2075	25	2184	36,4	14,5
	20%	84	2015	47	2146	35,8	37,3
60 km/h	100%	61	2753	8	2822	47,0	
	80%	61	2752	9	2823	47,1	1,9
	60%	61	2751	13	2825	47,1	4,9
	40%	61	2748	19	2828	47,1	11,0
	20%	61	2739	36	2837	47,3	28,4
40 km/h	100%	40	4101	5	4147	69,1	
	80%	40	4101	6	4147	69,1	1,3
	60%	40	4118	8	4167	69,4	3,3
	40%	40	4098	12	4151	69,2	7,4
	20%	40	4092	24	4156	69,3	19,2
20 km/h	100%	20	8141	3	8163	136,1	
	80%	20	8140	3	8163	136,1	0,6
	60%	20	8140	4	8164	136,1	1,7
	40%	20	8139	6	8165	136,1	3,7
	20%	20	8136	12	8168	136,1	9,7

- applicando il 50% della forza di frenatura massima per velocità comprese tra i 20 e i 40 km/h;
- applicando il 20% della forza di frenatura per velocità inferiori ai 20 km/h.

Dalla tabella 11 e 13 si evince che il maggior risparmio energetico (-16,7%), a pari velocità di marcia, si ha per convogli che viaggiano alla velocità massima di 80 km/h, considerando uno sforzo frenante applicato pari al 20% della forza massima applicabile, implicando che il macchinista anticipi la frenatura di circa 37,3 secondi rispetto al caso di applicazione del massimo sforzo per l'arresto ($v_{max}=80$ km/h, %FR= 100%).

Supponendo l'assenza di restrizioni o indicazioni relative a velocità minime o massime d'esercizio (a parte il tetto di 100 km/h legato alla configurazione del convoglio stesso), tale condizione di marcia rappresenta anche un buon *trade-off* tra consumo energetico in fase di frenatura e tempi di percorrenza, pari in questo caso a 37 minuti circa, con un risparmio energetico del 42% rispetto ad uno stesso convoglio che viaggia alla velocità massima di 100 km/h e il cui macchinista non anticipa la frenatura, dovendo utilizzare quindi il massimo sforzo per l'arresto nella stazione finale ($v_{max}=100$ km/h e %FR=100%). Velocità di

According to the speed, the minimum consumption was recorded (table 10):

- applying 20% of the maximum braking strength included between 80 and 100 kmph;
- applying 50% of the braking strength included between 60 and 80 kmph;
- applying 80% of the maximum braking strength included between 40 and 60 kmph;
- applying 50% of the maximum braking strength included between 20 and 40 kmph;
- applying 20% of the braking strength for speeds lower than 20 kmph.

Tables 11 and 13 show that the greatest energy savings (-16.7%) are obtained, at the same running speed, for trains which travel at the fastest speed of 80 kmph, considering a braking effort applied equal to 20% of the maximum applicable strength, which implies that the driver advances the braking by approx. 37.3 seconds versus the case of application of the maximum effort to stop ($v_{max}=80$ kmph, %FR 100%). Supposing the absence of restrictions or indications relevant to minimum and maximum service speeds (apart from the ceil-

SCIENZA E TECNICA

marcia più basse, sebbene risultino energeticamente più sostenibili, abbattere troppo la potenzialità della linea a causa dell'allungamento dei tempi di percorrenza (tabella 13), soprattutto in presenza di un traffico di tipo misto.

Se si analizzano le curve di fig. 11, si evince come l'energia di frenatura sia una funzione lineare rispetto al tempo di applicazione della forza per velocità superiori a 40 km/h, mentre si attesti a valori quasi costanti per velocità inferiori: ciò significa che a velocità elevate, anche un anticipo di pochi secondi nell'azione del freno comporta significative riduzioni di energia dissipata. Dall'andamento delle curve è possibile notare come l'energia dissipata ai freni sia una funzione lineare crescente per velocità superiori a 40 km/h rispetto al valore % della forza massima possibile applicata alle suole dei freni per effettuare l'arresto del convoglio. Di fatto l'energia dissipata aumenta all'aumentare della forza applicata. Per velocità inferiori o uguali a 40 km/h invece tale energia assume valori quasi costanti (o comunque cresce in modo molto limitato) per i differenti valori di forza applicata. Ciò significa che a velocità elevate, anche un anticipo di pochi secondi nell'azione del freno permette l'utilizzo di una minor forza frenante, comportando significative riduzioni di energia dissipata ai freni.

Nel grafico di fig. 12 vengono anche rappresentate le rette interpolanti inerenti all'energia dissipata in funzione della durata dell'azione frenante, per ogni valore di velocità di regime considerato. Si considerano le rette interpolanti in quanto sono più significative rispetto ai punti ottenuti tramite integrazione tabellare, affetti da pertur-

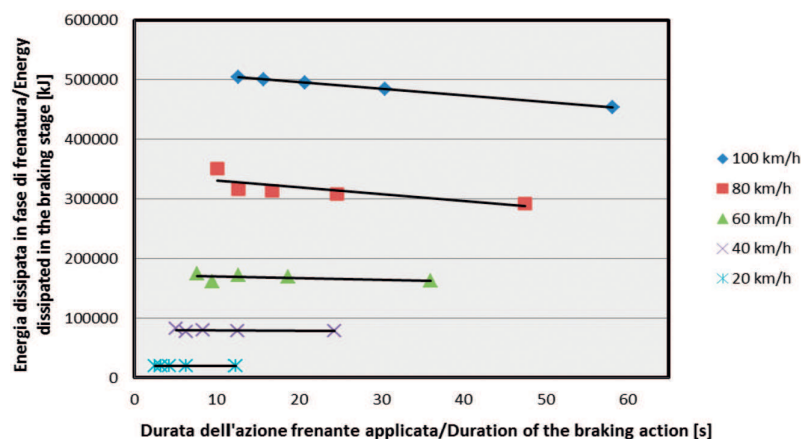


Fig. 12 - Rette interpolanti dei consumi energetici della fase di frenatura per differenti velocità d'esercizio in funzione della durata di applicazione della forza frenante.

Fig. 12 - Interpolating lines of the energy consumption at braking stage for different service speeds as a function of the duration of application of the braking action applied.

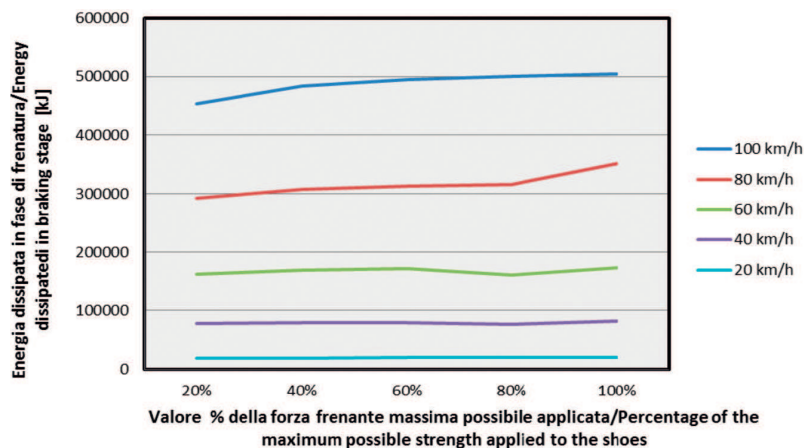


Fig. 11 - Curva dei consumi energetici in fase di frenatura per differenti velocità massime d'esercizio in funzione dell'azione frenante applicata.

Fig. 11 - Curve of the energy consumption at braking stage for different maximum service speeds as a function of the braking action applied.

ing of 100 kmph linked to the configuration of the train), such running conditions represent also a good trade-off between the energy consumption and coverage time, equal - in this case - to approximately 37 minutes, with energy saving of 42% versus the same train traveling at a max. speed of 100 kmph and whose driver does not anticipate the braking, thus having to utilise the max. effort to stop at the final station ($v_{max}=100$ kmph e $\%FR=100\%$).

Lower running speeds, even though they result to be more energetically sustainable, would excessively reduce the potential of the line because of the lengthening of the run time (table 13), mainly if the line were allocated to mixed traffic.

If the curves in fig. 11 are analysed, it appears that the braking energy is a linear function related the application time of the strength for speeds greater than 40 kmph, whilst it sets to almost stable values for lower speeds: this means that - at high speeds - even an advance of a few seconds in the braking action involves significant reductions in the dissipated energy. From the trend of these curves it is possible to notice how the dissipated energy at brakes is a linear function for speeds greater than 40 kmph with respect to the percent value of the maximum available force applied to the brakes for obtaining the train stop. Actually, the dissipated energy grows with the intensity of applied force. Differently for speeds smaller or equal to 40 kmph this energy features almost constant values for raising values of applied force. This means that at higher speeds

SCIENZA E TECNICA

bazioni di tipo numerico. Come accennato a riguardo di fig. 11, si nota che a velocità elevate, anche un anticipo di pochi secondi nell'azionamento del freno comporta significative riduzioni di energia dissipata alle ruote. Tale fenomeno è evidente per velocità elevate, mentre si riduce fin quasi a sparire per velocità d'esercizio minori.

Il metodo dell'integrazione dell'equazione del moto ha permesso quindi di individuare una forbice di coppie di valori velocità massima-forza di frenatura applicata, tali da permettere di definire quale sia l'esercizio migliore per il convoglio in questione dal punto di vista energetico e prestazionale, in funzione delle caratteristiche della linea, nonché di valutare come l'esperienza del macchinista possa influire decisamente sulle condizioni di usura dell'impianto frenante.

5. Conclusioni

L'articolo presenta una metodologia d'analisi dei consumi in ambito ferroviario in grado di isolare l'influenza di alcuni parametri caratterizzanti la marcia dei convogli, in particolare la massima velocità di marcia e lo sforzo frenante erogato per decelerare il treno. Quest'ultimo in particolare può essere usato come riferimento per modellizzare lo *stile di condotta* del macchinista. Nella prima parte dello studio presentato vengono presi in considerazione un convoglio passeggeri regionale ed un TGV in marcia sulla tratta Torino-Bardonecchia, confrontando i profili di marcia e di consumo rilevati con apposita strumentazione e quelli calcolati tramite un codice di simulazione.

In ogni caso, alla luce dei risultati ottenuti, pur nelle limitazioni sia del modello che della ridotta quantità dei rilievi effettuati, si può affermare che esiste la possibilità di ottimizzare la frenatura dei convogli passeggeri (di diversa tipologia) su una linea convenzionale e migliorare le prestazioni del materiale rotabile sulla stessa infrastruttura. Nella seconda parte invece viene presentata la simulazione della marcia di un convoglio merci percorrente la tratta Torino-Bussoleno, confrontando scenari diversi per velocità massima ed intensità dello sforzo frenante erogato. Si è riscontrato che per un convoglio merci di 20 carri percorrente una linea in piano alla velocità massima di 80 km/h, con una forza di frenatura applicata pari al 20% di quella massima disponibile, si registra un risparmio energetico in termini di energia dissipata pari al 46% rispetto al caso in cui viaggiasse a 100 km/h e il macchinista applicasse tutta la forza frenante ai limiti dell'aderenza. Questo fatto comporta un incremento del tempo di percorrenza di solo poco più di 5 minuti (+18,7%).

La metodologia presentata ha permesso non solo di valutare le caratteristiche prestazionali dell'esercizio (velocità, accelerazioni, durata delle fasi del moto, potenza necessaria) bensì anche di quantificare - attraverso parametri numerici - la qualità della marcia (e quindi della condotta del macchinista), mediante il calcolo della dura-

only, even a little anticipation (few seconds) of the braking action permits to reduce the braking effort, such involving significant reductions of the energy dissipated at brakes.

The diagram in fig. 12 shows the interpolating lines relevant to the dissipated energy as a function of the duration of the braking action for every value of cruising speed which has been taken into consideration. Interpolating lines are considered since they are more significant than the points obtained through numerical integration, which are affected by numeric perturbations.

As pointed out for fig. 11, it is possible to notice that at higher speeds, a little anticipation of the braking action causes a drop of the energy consumptions at brakes. This phenomenon is evident for higher velocities, while decreases - almost disappearing - for lower service speeds.

The method of integration of the motion equation has therefore allowed identifying a window of pairs of maximum speed-braking strength applied which allow defining what the best service is for subject train on the energy and performance point of view, as a function of the features of the line, as well as to ascertain that the experience of the driver can certainly influence the rate of wear of the braking system.

5. Conclusions

The paper presents an analysis methodology for consumptions in railways field able to isolate the influence of some parameters which characterise the trains run, in particular the maximum line speed and the braking effort deployed to decelerate the train. This latter in particular can be adopted as reference for modelling the driver's behaviour. In the first part of the study a passenger regional train and a TGV are taken into account. Runs between Turin and Bardonecchia (I) are considered, comparing the travel consumption profiles (measured with specific equipment) and those calculated with a simulation. Anyhow from the obtained results, taking into account the limitations of the model and the small quantity of measurements done, it is possible to state that it exists the possibility to optimise the braking of passenger trains on a conventional line and to improve the performances of the rolling stock on the same infrastructure.

On the other hand in the second part the simulation of a freight convoys is presented, running on the Turin-Bussoleno (I) section. A number of scenarios are compared, each of them featuring different maximum speeds and braking effort intensity. It has been found that for a 20-cars freight convoys running on a flat line at the top speed of 80 kmph, adopting a braking effort equal to 20% of the maximum available one, the energy saving (in terms of dissipated energy) is equal to 46% with respect to the case that the train would run at 100 kmph and the driver would deploy all the braking effort available (at adhesion limits). This

SCIENZA E TECNICA

ta della fase di frenatura (e del suo eventuale anticipo) e della stima dell'energia dissipata meccanicamente.

In base alla caratteristiche del materiale rotabile e della linea è possibile quindi valutare quale sia il miglior profilo di velocità - quindi quale sia lo stile di condotta ottimale che il macchinista dovrebbe adottare - al fine di soddisfare determinati requisiti temporali e/o di consumo energetico, definendo analiticamente opportune relazioni matematiche che legano l'energia dissipata durante la marcia con la velocità e con l'entità della forza frenante applicata, funzioni indirette dello stile di condotta tenuto dal macchinista.

Per il caso di convogli merci si è riscontrato che tanto maggiore è la velocità di marcia del treno, tanto maggiore sarà il risparmio di energia dissipata ai ceppi se si anticipa anche di poco l'istante di azionamento del freno (sebbene comunque l'energia dissipata sarà comunque in termini assoluti sempre maggiore rispetto a regimi di marcia caratterizzati da velocità minori): in particolare, i risultati ottenuti hanno anche dimostrato come lo stile di condotta del macchinista stesso possa notevolmente influenzare l'aspetto energetico dell'esercizio ferroviario. Una condotta del treno caratterizzata da azioni frenanti più contenute, con un anticipo delle stesse anche di pochi secondi, permette di sfruttare l'effetto "naturale" di rallentamento dovuto all'azione delle forze aerodinamiche, contribuendo a diminuire l'energia dissipata meccanicamente dal sistema frenante, che si ripercuote su una minor usura delle componenti, minori interventi manutentivi ed un conseguente allungamento della vita utile dei rotabili stessi.

La metodologia presentata potrebbe d'altro canto essere uno strumento analitico utile sia per definire una correlazione tra l'esercizio del materiale ferroviario e lo stato di usura dell'impianto frenante (in particolare per i treni merci che percorrono linee a forti pendenze) sia per una programmazione del servizio più accurata, che tenga conto anche dell'aspetto energetico. Grazie anche all'introduzione di nuovi sistemi di *segnalamento e controllo*, in grado di modificare attivamente il profilo di marcia che il treno deve mantenere (si pensi, per esempio, ad implementazioni con ETCS-2), le fasi di frenatura potrebbero così essere limitate sia in numero che in intensità, permettendo di monitorare le condizioni di lavoro a cui sono sottoposti i rotabili.

Appare chiaro dunque come la definizione di uno stile di condotta che riduca al minimo l'utilizzo di brusche frenate, favorendo anche tratti a marcia inerziale, rappresenti una possibile soluzione per il raggiungimento di migliori standard di esercizio. Di conseguenza, uno studio attento delle velocità di percorrenza in funzione delle caratteristiche della linea e del materiale rotabile impiegato, in relazione ad uno specifico servizio, potrebbe condurre alla definizione di nuovi parametri per l'esercizio ferroviario, dove il concetto di "contenimento energetico" potrebbe determinare benefici dal punto di vista della razionalizzazione delle risorse, in particolare per quanto ri-

causes an increase in the running time of some more than 5 minutes (+18.7%).

The presented methodology has enabled not only to assess the performance features of the service (speed, acceleration, duration of the motion stages, power required) but also to quantify - in numerical parameters - the quality of the running (and therefore the driving style) through the length calculation of the braking stage (and of its anticipation, if any) as well as of the estimate of the energy which is mechanically dissipated.

On the basis of the features of both the rolling stock and the line, it can then be assessed what the best speed profile would be and - subsequently - the optimum style the driver should adopt in order to meet some given time and/or energy consumption requirements, by the analytical definition of appropriate mathematic ratios which link the energy dissipated during the running and with the entity of the breaking strength applied which are indirect functions of the driving style.

In the case of the freight trains, it has been realised that the faster the cruising speed of the train is the greater the saving in the energy dissipated to the shoes will be if the instant of the operation of the brake is anticipated, even if by little (even though the dissipated energy shall in any case be greater - in absolute terms - than in lower cruising speeds): in particular, the results obtained have also shown that the driving style may significantly affect the energy performance of the railway service. A driving characterised by more contained braking actions, even if anticipated by a few seconds only, allows exploiting the "natural" effect of slowing down due to the action of the aerodynamic strength, thus contributing to diminish the energy which is mechanically dissipated by the braking system and ensuring lower wear of the components, lower maintenance actions and subsequently lengthening the useful life of the rolling stock.

On the other hand, the methodology presented could be a useful analysis tool for defining a correlation between the service of the rolling stock and the state of wear of the braking system (with particular reference to the freight trains which cover lines characterised by steep grades), as well as for a more accurate scheduling of the service, which takes also into account the energy aspect. Thanks also to the introduction of new signalling and control systems, able to actively modify the target running diagram (for example, applications with ETCS-2 could be imagined), the braking stages could then be limited in terms of both number and intensity, allowing the monitoring of the working conditions the rolling stock is submitted to.

It is therefore clear that the definition of a driving style which minimises the use of abrupt braking, fostering also coasting stretches, represents a viable solution to attain the best service standards.

Consequently, a careful study of the running speeds as a function of the features of both the line and the rolling

SCIENZA E TECNICA

guarda i consumi elettrici e il miglior utilizzo del parco rotabile.

È infine opportuno rimarcare che non si tratta solo di una problematica ambientale, dal momento che la razionalizzazione dei consumi è ormai una tematica che preoccupa sia i gestori delle infrastrutture sia gli operatori da un punto di vista economico, specie nei confronti di altre modalità di trasporto in termini di consumo specifico (kJ/pass-km o kJ/t-km). Non trascurabile sarebbe poi il positivo impatto economico dovuto alla riduzione della *manutenzione anticipata* causata dal consumo eccessivo degli organi di frenatura dell'impianto frenante. I due principali margini d'intervento per ridurre il consumo energetico nell'esercizio sono la definizione di tabelle di marcia ottimali ed efficienti stili di condotta - detti anche "ecodriving" - secondo cui, assegnato un tempo di percorrenza, si definisce il profilo di velocità a cui corrispondano i minimi consumi energetici.

Ringraziamenti

Non sarebbe stato possibile svolgere questo lavoro senza la collaborazione tra università e aziende. Gli autori ringraziano il Politecnico di Torino, la Faiveley Transport Italia SPA, le Ferrovie dello Stato e le Ferrovie SNCF. In particolare per Trenitalia, gli Ingg. CARILLO, PRESCIANI, CAPOSCIUTTI, DE RISI; per Faiveley Transport Italia SPA gli Ingg. TIONE, PERABONI, CORATELLA, BOTTA, TALONI e PARECCHINI. Per SNCF e Trenitalia-Regione Piemonte si ringraziano i macchinisti e capotreni del convoglio TGV e del convoglio regionale, i quali hanno fornito dati ed informazioni utili per la stesura di questo articolo.

stock utilised, as a related to specific operation, could lead to the definition of new parameters for the railways service, where the concept of "energy containment" could be beneficial as related to the rationalisation of the resources, with particular reference to electrical consumption and better exploitation of the rolling stock fleet.

It is finally worthwhile to remark that this is not just an environment issue, since the consumption rationalisation is now a theme that concerns both the infrastructure managers and the operators from an economical point of view, mainly in regard to other transport modes in terms of specific consumption (kJ/pass-km o kJ/t-km). Moreover the positive economic impact due to the reduction of the unexpected maintenance caused by the over-wear of the braking system would not be negligible as well. The two main intervention directions for reducing the energy consumption are the definition of proper timetables and efficient driving behaviours - also known as "ecodriving" - which allow, once fixed a travel time, to define the speed profile implying the minimum energy consumptions.

Acknowledgements

This work could not be developed without the cooperation between university and companies. The authors want to thank Politecnico di Torino, Faiveley Transport Piossasco SpA, Ferrovie dello Stato and the French Railways (SNCF). In particular, for Trenitalia, Messrs' CARILLO, PRESCIANI, CAPOSCIUTTI, DE RISI; for Faiveley Transport Piossasco SpA, Messrs' TIONE, PERABONI, CORATELLA, BOTTA, TALONI and PARECCHINI. For SNCF and Trenitalia-Regione Piemonte, we wish to thank the drivers and train conductors of the TGV and regional trains, who have provided useful data and information for the drafting of this article.

BIBLIOGRAFIA – REFERENCES

- [1] DALLA CHIARA B., RICAGNO R., SANTARELLI M., "Sostenibilità energetica dei trasporti: analisi dei consumi e della soluzione ferroviaria", *Ingegneria Ferroviaria*, vol. LXIII, ISSN: 0020-0956, n. 6, pp. 531-543, giugno 2008.
- [2] DI MAJO F., SCIARRONE G., "Le altissime velocità nel futuro dei trasporti guidati", Centro Studi sui sistemi di Trasporto, 1990.
- [3] Politecnico di Torino, Ingegneria, Dip. DIATI – Sistemi di Trasporto, "Consumi energetici nell'esercizio ferroviario", Report interno da uno studio effettuato per Consul System SpA, 2014.
- [4] CHEVRIER R., MARLIÈRE G., RODRIGUEZ J., "Saving Energy in Railway Management with an Evolutionary Multiobjective Algorithm: application and case study", WCCR 2011, 9th World Congress on Railway Research, Université Lille Nord de France.
- [5] CUCALA A.P., FERNÁNDEZ A., SICRE C., DOMÍNGUEZ M., "Fuzzy optimal schedule for high speed train operation to minimize energy consumption with uncertain delays and driver's behavioral response", *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 25, pp.1548-1557, 2012.
- [6] KIM K., OH S., HAN M., "A mathematical approach for reducing the maximum traction energy: the case of Korean MRT trains", *Proceedings of the International Multiconference of Engineers and Computer Scientists*, Vol. 3, pp. 2169-2173, 2010.
- [7] MALAVASI G., PALLESCHI P., RICCI S., "Driving and operation strategies for traction-energy saving in mass rapid transit systems", *Proc. Inst. Mech. Eng., Part F: J. Rail Rapid Transit* 225 (5), pp. 475-482, 2011.

SCIENZA E TECNICA

- [8] SICRE C., CUCALA A.P., FERNÁNDEZ A., JIMÉNEZ J.A., RIBERA I., SERRANO A., "A method to optimise train energy consumption combining manual energy efficient driving and scheduling", WIT Trans. Built Environ. 114, pp. 549-560, 2010.
- [9] FS – Ferrovie dello Stato, "Prefazione Generale all'orario di servizio 2011".
- [10] DI MAJO F., "Costruzione di materiale ferroviario", Levrotto&Bella, 1979.
- [11] FS – Ferrovie dello Stato, "Capitolato di fornitura della Locomotiva E464 I/VDR.APP.N/F/730.001 – all. 4-3-96 FS".
- [12] FaiveleyTransport, "Descrizione tecnica DT3633_A00: equipaggiamento del freno ed impianto pneumatico della Locomotiva E464. Piossasco", 06-04-2011.
- [13] FaiveleyTransport, "Sistemi di controllo del Freno Ferroviario – RailwayBrake Control System", FaiveleyTransport Italia, 2006.
- [14] SACCO L., COLTRO N., DALLA CHIARA B., "Calculations of the carrying capacity and energy consumption on the Turin-Modane railway connection: application of models and simulations./Calcolo della potenzialità e dei consumi energetici del collegamento ferroviario Torino-Modane: applicazione di modelli e simulazione", Ingegneria ferroviaria, vol. LXVI, ISSN: 0020-0956, n. 10, pp. 831-858, 2013.
- [15] CARPIGNANO A., "Meccanica dei trasporti ferroviari e tecnica delle locomotive", Levrotto&Bella, Torino, 2003.
- [16] TAGLIAFERRI A., MATRICARDI A., "Nozioni sul freno ferroviario", CIFI - Collegio Ingegneri Ferroviari Italiani, 2001.
- [17] Direzione Generale per le Infrastrutture Ferroviarie e per l'Interoperabilità Ferroviaria - Lavori di adeguamento delle linee esistenti: il Frejus, <http://www.mit.gov.it/>
- [18] Trenitalia ed SNCF - orario di servizio 2011-12.

Sommaire

LA CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE DES TRAINS EN FONCTION: SIMULATION, MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE ET INFLUENCE DU STYLE DE CONDUITE

L'article propose une méthodologie d'analyse des consommations énergétiques dans le domaine ferroviaire, et il présente une comparaison entre un modèle de calcul analytique et des mesures, tout en introduisant l'influence sur les consommations de certains paramètres caractérisant le tracé horaire. Dans la première partie l'article présente l'analyse des profils de vitesse mesurés respectivement d'un train passagers régionale et d'un TGV, qui parcourent une ligne traditionnelle à forte pente (la Turin-Modane), en suite les deux profils sont comparés aux profils théoriques obtenus par simulation. A partir de cette comparaison il est donc possible de déduire et quantifier les différences entre le profil de marche effectif et le simulé, lequel, pouvant exploiter complètement les caractéristiques de traction du convoi se caractérise par la moindre durée de parcours possible sur la ligne en examen. Dans la deuxième partie, à travers l'intégration de l'équation du mouvement implémentée sur une feuille de calcul, l'article analyse la marche d'un convoi frette qui parcourt seulement une première partie de la même ligne. Dans cette partie l'analyse se déroule en introduisant des importantes simplifications au fin de simplifier le modèle analytique, comme par exemple en négligeant les effets dû à la géométrie de la ligne (plutôt plaine dans la partie de ligne en considération). Sous telles hypothèses l'article analyse donc l'influence que le tracé horaire et le style de conduite ont sur les consommations énergétiques. Majeur relief est donné aux aspects énergétiques liés à la phase de freinage, avec les retombées liées - d'impact économique directe pour les opérateurs de transport - sur l'entretien des freins et les salles montées. L'article met enfin en évidence le rôle des particulières solutions technologiques innovatrices présentées.

Zusammenfassung

RECHNUNG UND MESSUNGEN VON ENERGIEBEDARF DER ZÜGEN UND ANALYSE DER BEEINFLÜSSUNG DER FÜHRUNGSWEISE

Vorschlag einer Methode für die Analyse des Energiebedarfs der Züge. Dafür wird es ein Vergleich entwickelt, der zwischen einer Reihe von gemessenen Geschwindigkeitsprofilen und ein berechnetes Geschwindigkeitsprofil stattfindet. Die minimale Laufzeit ist vom berechneten Profil aufgeweint. Es wird auch die Beeinflussung von besonderen Merkmalen der Zeitwegeplanen verdeutlicht.

Ein erster Teil befasst sich von zwei Zugtypen, ein Regio und ein TGV, die auf eine Linie mit hohen Neigungen fahren (im Fall die Turin-Modane). Im zweiten Teil, mittels ein vereinfachten Rechenverfahren, wird es der Zeitwegeplan eines Güterzug simuliert, der auf eine Flachland Linie läuft. Das Vergleich bezieht sich auf die technischen und ökonomischen Folgerungen der Lockführerführungweise, sei es in Fraktion oder in Bremsung, so wie auf der Unterhaltung von Bremsaggregaten und Radsätzen. Es wird auch die Rolle von innovativen Lösungen deutlich gemacht.